



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNU RUUSALA
KOULUJEN JA PÄIVÄKOTIEN LASKENNALLINEN JA TOTEUTU-
NUT ENERGIANKULUTUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Rakentamisen ja talouden tiedekun-
nan kokouksessa 4. marraskuuta
2015

TIIVISTELMÄ

ANNU RUUSALA: Koulujen ja päiväkotien laskennallinen ja toteutunut energiankulutus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 73 sivua, 8 liitesivua

Toukokuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: koulu, päiväkot, energiankulutus, Suomen rakentamismääräyskokoelma, standardikäyttö, kuukausitason laskentamenetelmä

Tutkimuksessa haluttiin selvittää kuinka hyvin standardikäytöllä ja Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 (2012) laskentaohjeilla pystytään ennustamaan koulu- ja päiväkotirakennuksen energiankulutus ja kuinka rakentamismääräyskokoelman energiamääräyksiä kehittyminen on vaikuttanut rakennusten energiankulutukseen. Kulutuksien erojen suuruus ja syyt haluttiin myös selvittää.

Koulujen ja päiväkotien toteutunutta energiankulutusta tutkittiin keräämällä toteutuneet sähkö- ja lämmitysenergian kulutustiedot Helsingistä ja Tampereelta vuodelta 2014 sekä normeeraamalla lämmitysenergian kulutus, jotta eri kaupunkien kulutukset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Otoksot vaihtelevat hieman, mutta mukana otoksessa, jossa tutkitaan energiankulutuksen suhdetta rakennusvuoteen, on 38–43 % kouluista ja päiväkodeista, joita on yhteensä 558. Mukana otoksessa ovat kohteet, joista kulutustiedot ovat olleet saatavilla. Case-kohteita on yhteensä 22.

Toteutuneen sekä laskennallisen energiankulutuksen vertailu tehtiin laskemalla rakentamismääräyskokoelman osan D5 (2012) ja D3 (2012) mukaan kulutus case-kohteille ja vertaamalla saatua arvoa toteutuneeseen kulutukseen. Case-kohteet on rakennettu vuoden 2005 aikana tai jälkeen ja ne sijaitsevat Helsingissä, Tampereella ja Oulussa. Toisella laskentakierroksella säävyöhyke vaihdettiin paikalliseen säävyöhykkeeseen ja ilmanvaihtomäärät vaihdettiin suunniteltuihin ilmanvaihtomääriin. Toteutuneelle ja laskennalliselle kulutukselle laskettiin eräitä energiankulutukseen liittyviä tunnuslukuja sekä verrattiin niiden vaikutusta energiankulutukseen.

Tarkasteltaessa toteutunutta kulutusta rakennusvuoden suhteen, voidaan huomata, että lämpöenergiankulutus ja energiankulutus yhteensä ovat pienentyneet sekä sähköenergiankulutus on kasvanut. Päiväkodit kuluttavat enemmän energiaa bruttoneliötä kohden kuin koulut.

Tuloksista saadaan laskennallisten ja todellisten energiankulutuksien eron keskiarvoksi lämmölle +68,7 %, sähkölle +15,4 % ja energialle yhteensä +41,3 % laskennallisesta. Minimi ja maksimi-arvot lämmölle ovat −30,7 % ja +211,1 %, sähkölle −61,1 % ja +54,9 % sekä energialle yhteensä −19,3 % ja 126,5 %. Korvaamalla ilmanvaihtomäärät suunnitelluilla ilmamäärillä ja vaihtamalla säävyöhyke paikalliseksi, saadaan tilanne, joka ei aina vastaa paremmin todellisuutta. Laadituista kuvaajista käy ilmi että ominaislämpöhäviöiden suhde nettopinta-alaan on tutkituista indikaattoreista parhaiten lämpöenergian kulutukseen korreloiva arvo.

ABSTRACT

ANNU RUUSALA: Calculated and Measured Energy Consumption of Schools and Day Care Centers

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 73 pages, 8 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: Energy Consumption, Day Care Center, School, The National Building Code of Finland, Standard Operation, Monthly Calculation Method

The aim of this thesis is to find out how well The National Building Code of Finland can part D5 (2012) can estimate the energy consumption of a building and what kind of effect the development of laws regarding energy consumption has had on the real energy consumption of day cares and schools. The differences between calculated and measured consumption is determined along with the reasons for the differences.

The real energy consumption was studied by collecting electricity and heating consumption data from day care centers and schools in Helsinki and Tampere in the year 2014. The heating consumption is normalized so that consumptions of different cities would be comparable. When the relation between construction year and energy consumption is studied the size of the sample varies between 38–43 % of schools and day care centers, which sum up to 558. The sample contains all consumption data that was accessible. The amount of case buildings is 22.

The calculation of the energy consumption for case-buildings is done as Excel calculation and accordingly to The National Building Code of Finland parts D3 (2012) and D5 (2012). The case buildings are located in Helsinki, Tampere and Oulu and those are constructed in the year 2005 or later. The second round of calculations is done with designed amount of ventilated air and local weather zone. Some indicators and their correlation for energy consumption are studied for real and calculated energy consumption.

Taking a look into the changes in energy consumption over past decades reveals that the heating and total energy consumption have decreased whereas electricity consumption has increased. Day care centers consume more energy per square meter than schools.

When comparing the real and calculated energy consumption it was found that real energy consumption was +68.7 % for heating, +15.4 % for electricity and +41.3 % for total energy compared to the calculated energy consumption. Minimum and values are –30.7 % for heating, –61.1 % for electricity and –19.3 % for total energy. Maximum values are +211.1 % for heating, +54.9 % for electricity +126.5 % for total energy. Changing the amounts of ventilated air to designed amounts and weather zone to local one does not always make the results more accurate. It was also found that out of the studied indicators the best indicator for calculated heating energy consumption is the overall transmission heat transfer coefficient divided by net floor area.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty vuosien 2015 ja 2016 aikana Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle osana Comprehensive Development of Nearly Zero-Energy Municipal Service Buildings -hanketta (COMBI-hanketta). Hanke pyrkii etsimään tehokkaita ja turvallisia ratkaisuja palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi lähes nollaenergiatasolle.

Kiitän Tampereen, Helsingin ja Oulun tilapalveluita yhteistyöstä, Anssi Laukkarista työn ohjaamisesta sekä työyhteisöäni hyvistä neuvoista. Professori Juha Vinhaa kiitän työn tarkastamisesta ja ohjaamisesta.

Tampereella, 25.05.2016

Annu Ruusala

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	VI
2.	TEOREETTINEN TAUSTA	3
2.1	Lämmön siirtyminen	3
2.1.1	Johtuminen ja varastoituminen	4
2.1.2	Konvektio	7
2.1.3	Säteily	8
2.1.4	Lämmönsiirtymismuotojen yhdistelmät	10
2.2	Rakennuksen energiantarve	11
2.2.1	Lämpöolot	13
2.2.2	Ikkunat ja aurinkosuojaus	15
2.2.3	Ilmanvaihto ja vuotoilma	15
2.2.4	Talotekniikka	17
2.2.5	Uusiutuvan energian pientuotanto	18
2.3	Laskennallinen energiankulutus ja E-luku	19
2.3.1	U-arvon laskenta	24
2.3.2	Lämpöenergian kulutus	26
2.3.3	Sähköenergian kulutus	37
2.3.4	Ostoenergia ja tasauslaskelma	40
3.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	44
3.1	Kohteet	44
3.2	Tutkimusmenetelmät	45
4.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	48
4.1	Toteutunut energiankulutus rakennusvuoden mukaan	48
4.1.1	Koulujen ja päiväkotien energiankulutuksen erot	51
4.2	Case-kohteiden laskennallisen ja toteutuneen energiankulutuksen vertailu	53
4.2.1	Energiankulutusten vertailu suunnitelluilla ja standardikäytön mukaisilla ilmamäärillä case-kohteissa	62
4.2.2	Virhelähteet ja tulosten arviointi	65
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	68
	LÄHTEET	71

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTÄVÄT SÄÄTIEDOT

LIITE B: LASKENTATULOKSET STANDARDIKÄYTÖLLÄ

LIITE C: LASKENTATULOKSET SUUNNITELLUILLA
ILMANVAIHTOMÄÄRILLÄ JA TODELISELLA SÄÄVYÖHYKKEELLÄ

MERKINNÄT JA LYHENTEET

α	Terminen diffusiviteetti [m^2/s]
α	Absorptiokerroin [-]
β	Moniulotteisen lämpövirtauksen huomioon ottava korjauskerroin [-]
γ	Lämpökuorman ja tilan lämmitysenergian tarpeen suhdeluku [-]
ε	Emissiviteetti [-]
η	Hyötysuhde [-]
λ	Lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
ν	Säteilyn lankeamiskulma [$^\circ$]
v_a	Ilmavirran nopeus [m/s]
ρ	Tiheys [kg/m^3], heijastuskerroin [-]
σ	Stefan-BolzmANNIN vakio [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$]
τ	Läpäisykerroin [-]
τ	Rakennuksen aikavakio [h]
Φ	Lämpövirta [W]
ϕ	Teho [W]
χ_j	Pistemäisen kylmäsillan j aiheuttama lisäkonduktanssi [W/K]
Ψ	Viivamainen lisäkonduktanssi [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
A	Pinta-ala [m^2]
a	Numeerinen parametri [-]
b	Lämpenemiskerroin [$\text{W}\cdot\sqrt{s}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
C_{rak}	Rakennuksen sisäpuolinen lämpökapasiteetti [$\text{W}\cdot\text{h/K}$]
c	Ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
d	Materiaalikerroksen paksuus [m]
E	Kokonaisenergia [W/m^2]
F	Korjauskerroin [-]
F_{suunta}	Muuntokerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan ilmansuunnittain pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi [-]
G	Säteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti [kWh/m^2]
g	Putoamiskiihtyvyys [m/s^2]
g	Ikkunan lasiosan auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin. [-]
H	Ominaislämpöhäviö [W/K]
h	Lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
K_{maks}	Huipputehokerroin aurinkosähkökennolle [-]
k	Käyttöaste [-]
L	Lämmön jakelujärjestelmän meno- ja paluuputkien yhteenlaskettu pituus lämmittämättömässä tilassa [m]
l	Pituus [m]
m	Massa [kg]
n	Lukumäärä [-]

n_{50}	Ilmanvuotoluku [1/h]
Q	Lämpöenergia [J, kWh, kWh/a]
q	Lämpövirran tiheys [W/m^2]
q_v	Ilman tilavuusvirta [m^3/s]
q_{50}	Ilmanvuotoluku [$m^3/(h \cdot m^2)$]
P	Teho [W]
R	Lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
T	Lämpötila [K, °C]
t	Aika [h]
t_d	ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte [h/24h]
t_v	Ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhte [vrk/7 vrk]
U	Lämmönläpäisykerroin (U-arvo) [$W/(m^2 \cdot K)$]
W	Sähköenergia [kWh, kWh/a]
x	Rakennuksen vuotoilmakertoimen laskemisessa käytettävä kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 sekä viisikerroksisille ja sitä korkeimmille rakennuksille 15
V	Tilavuus [m^3]
E-luku	Energiatehokkuusluku. E-Luku saadaan laskemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot lämmitettyä nettopinta-alan yksikköä kohden. [kWh_E/m^2]
g-arvo	Ikkunan lasiosan auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin. Suhdeluku välillä 0–1. Nolla tarkoittaa että säteilyä ei pääse lainkaan ikkunan läpi.
IDA-ICE	IDA Indoor Climate and Energy -tietokoneohjelma.
LTO	Lämmöntalteenotto.
SFP	Ominäistehontarve [$kW/(m^3/s)$]
SPF-luku	Seasonal Performance Factor -luku
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma.
U-arvo	Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen käänteisluku ympäristöstä ympäristöön. [$W/(m^2 \cdot K)$]

1. JOHDANTO

Euroopan unionin ilmasto- ja energiapoliittisiin tavoitteisiin kuuluu kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen vuoden 1990 tasosta 20 prosentilla, uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen 20 prosenttiin loppukulutuksesta sekä ohjeellisesti energiatehokkuuden parantaminen 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. [1, s. 12] Näihin tavoitteisiin pyritään muun muassa lähes nollaenergiarakennuksien avulla. Vuoden 2019 alusta alkaen uusien käyttöönotettavien palvelurakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia ja vuoden 2021 jälkeen kaikkien uusien rakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia. Lähes nollaenergiatasoa ei ole Suomessa vielä määritetty, mutta tämän opinnäytteen kirjoitushetkellä määrittely on käynnissä Ympäristöministeriössä.

Tanskassa on käynyt ilmi, ettei asuinrakennusten energiankulutus määräyksistä huolimatta putoa halutulle tasolle. Aiempina vuosikymmeninä suurin osa rakennuksista on saanut kulutuksensa pysymään alle senhetkisen määräystason, mutta 2000-luvun puolella määräysten mukainen kulutus on alkanut ylittyä selvästi useammin. [2, s. 29] Palvelurakennukset eivät suoraan vastaa asuinrakennuksia, mutta vastaava trendi on mahdollinen myös niiden kohdalla.

Rakennuksen energiankulutus, tasauslaskelma ja energiatodistus lasketaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) mukaan noudattaen Ympäristöministeriön asetusta 176/2013. Energiatodistuksen ja tasauslaskelman on tarkoitus olla keinoja, joilla rakennuksen energiatehokkuus voidaan laskennallisesti osoittaa jo lupavaiheessa. Energiatodistuksesta käy ilmi ostoenergiankulutus ja E-luku, joka ohjaa ympäristöystävällisempiin energiaratkaisuihin.

Mikäli ostoenergiankulutus vähenee laskennallisesti, mutta ei todellisuudessa, tehdään turhia investointeja ja energiansäästötavoitteet saattavat jäädä tavoittamatta. Tällöin laskentasääntöjä täytyy korjata ja keskittyä erilaisiin keinoihin energiankulutuksen vähentämiseksi.

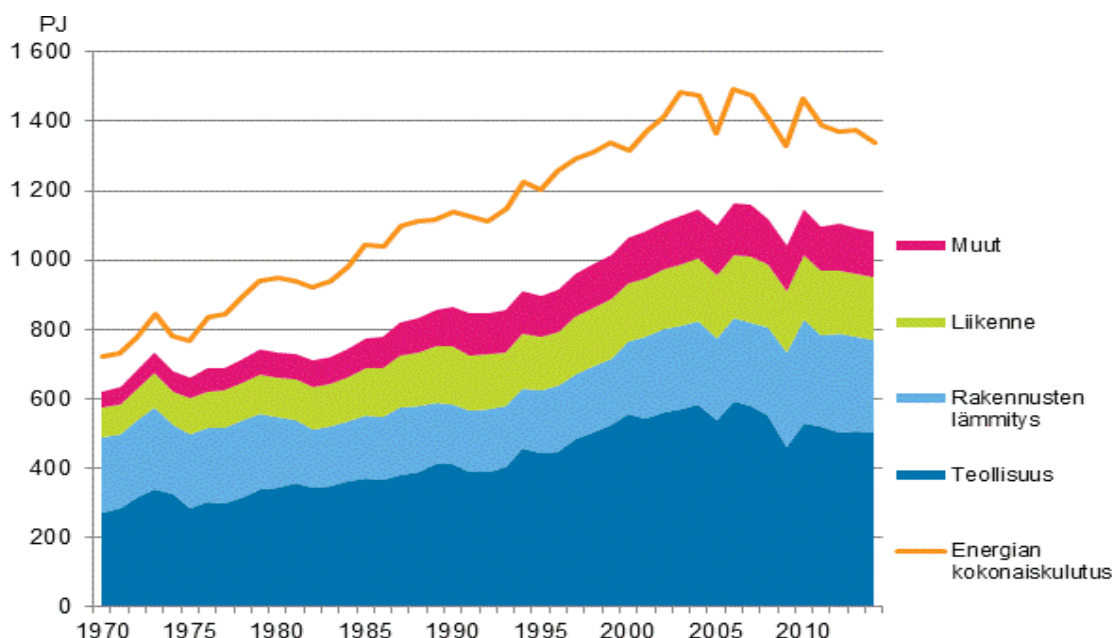
Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, kuinka tarkasti Suomen rakentamismääräyskokoelman osien D3 (2012) ja D5 (2012) avulla laskettu energiankulutus vastaa toteutunutta energiankulutusta, ja kuinka määräysten kehittyminen on vaikuttanut energiankulutukseen kouluissa sekä päiväkodeissa. Tutkittaessa rakennusvuoden vaikutusta energiankulutukseen energiaremonttien vaikutuksia ei ole huomioitu. Työssä tutkitaan myös laskentamenetelmän ongelmia ja soveltuvuutta näiden rakennustyyppien energialaskentaan. Laskenta tehdään kuukausitason laskentamenetelmällä ilman

laskentaohjelmilla tehtäviä simulointeja. Vuosittainen lämmitysenergia suhteutetaan S17 lämmitystarveluvuilla vertailukelpoisiksi arvoiksi.

Tiedon kerääminen toteutettiin yhteistyössä Tampereen, Helsingin ja Oulun tilapalveluiden kanssa. Rakentamismääräyskokoelman mukaisen energiankulutuksen toteutusta tutkittiin tekemällä laskelmat case-kohteille ja vertaamalla toteutunutta kulutusta saatuun laskelmaan. Case-kohteiksi on valittu rakennuksia, jotka on rakennettu vuoden 2005 aikana tai jälkeen.

2. TEOREETTINEN TAUSTA

Rakennusten lämmitystarve muodostaa suuren osan energian kokonaiskulutuksesta Suomessa, kuten kuvasta 2.1 nähdään. Kuvasta nähdään myös, että rakennusten lämmitykseen kuluvan energian määrä on kasvanut viimeisen 20 vuoden aikana, mutta kasvun kääntyminen laskuksi saattaa olla aluillaan, sillä teollisuuden energiankulutus on pysynyt lähes samana muutamana vuotena, mutta rakennusten lämmityksessä näkyy pieni alenema. Rakennusten lämmitys kattaa myös toiseksi suurimman sektorin energiankulutuksesta.



Kuva 2.1 Energian kokonaiskulutus ja loppukäyttö Suomessa 1970–2014 [3].

Kun pyritään pienentämään rakennusten energiankulutusta, on tärkeää kiinnittää huomiota lämmöneristykseen, tiiveyteen ja taloteknisten järjestelmien tehokkuuteen. Tässä luvussa käsitellään lämmönsiirtymisen teoriaa, energiantarpeen muodostumista, rakentamismääräyskokoelman mukaista standardikäyttöä, tasaus- ja energialaskentaa sekä E-luvun laskentaa. Lämmönsiirtymisen teoria on taustaa rakennusvaipan lämpöhäviöiden laskennalle.

2.1 Lämmön siirtyminen

Lämmön johtumisessa värähtely siirtyy molekyylisestä tai atomista toiseen, siten että partikkelit itse eivät vaihda paikkaa [4, s. 4]. Stationäärisessä tilanteessa lämpötila ei riipu ajasta [4, s. 16].

Konvektiossa lämmön siirtyminen tapahtuu aineen liikkuesssa. Lämpöä siirtyy aineen mukana ominaislämpökapasiteetin avulla. Tyypillisesti rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa fluidina on ilma, mutta toisinaan myös vesi. [4, s. 4] Luonnollista konvektiota tapahtuu fluidissa, kun siihen syntyy tiheyseroja, esimerkiksi lämpötilan vaikutuksesta [6, s. 51]. Pakotetussa konvektiossa fluidi liikkuu ulkoisen voiman, esimerkiksi tuulen, vaikutuksesta [5, s. 41].

Kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lähettävät, eli emittoivat, lämpösäteilyä. Säteilyn osuessa pintaan, se heijastuu, absorboituu tai läpäisee aineen. [5, s. 40] Lämpösäteily siirtyy ilman väliainetta eri lämpötiloissa olevien pintojen välillä [4, s. 4].

2.1.1 Johtuminen ja varastoituminen

Lämmön johtumista homogeenisessa ja isotrooppisessa aineessa voidaan tarkastella Fourierin lain avulla

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (2.1)$$

jossa q (W/m^2) on lämpövirran tiheys x , y , ja z ovat suuntakoordinaatteja, λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) on aineen lämmönjohtavuus sekä T (K) lämpötila. Lämmönjohtavuus vaihtelee materiaaleittain. Miinusmerkki yhtälön edessä kuvaa lämmön siirtymistä korkeammasta lämpötilasta matalampaan, eli päinvastaiseen suuntaan gradientin kanssa. Lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo λ_U ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) on SFS-EN -standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan määritetty arvo. Se kattaa mittaustulosten hajonnan sekä lämpötilan, kosteuspitoisuuden ja ikääntymisen vaikutukset lämmönjohtavuuteen. [5, s. 41]

Yksidimensionaalisessa tapauksessa lämpövirran tiheys materiaalissa on

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.2)$$

jossa λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) on aineen lämmönjohtavuus ja T (K) lämpötila. Edelleen yksikerroksiselle materiaalille voidaan muotoilla

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (2.3)$$

jossa λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) on aineen lämmönjohtavuus ja T (K) lämpötila, d (m) materiaali-kerroksen paksuus, T_1 (K) korkeampi lämpötila ja T_2 (K) matalampi lämpötila. [4, s. 15]

Lämpövirta Φ (W) materiaalin läpi on

$$\Phi = qA = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d}, \text{ jossa} \quad (2.4)$$

λ (W/(m·K)) on aineen lämmönjohtavuus, A (m²) pinta-ala, T (K) lämpötila, d (m) materiaalikerroksen paksuus, T_1 (K) korkeampi lämpötila ja T_2 (K) matalampi lämpötila. [4, s. 17]

Yksikerroksisen materiaalin lämmönvastus R (m²·K/W) voidaan ilmaista

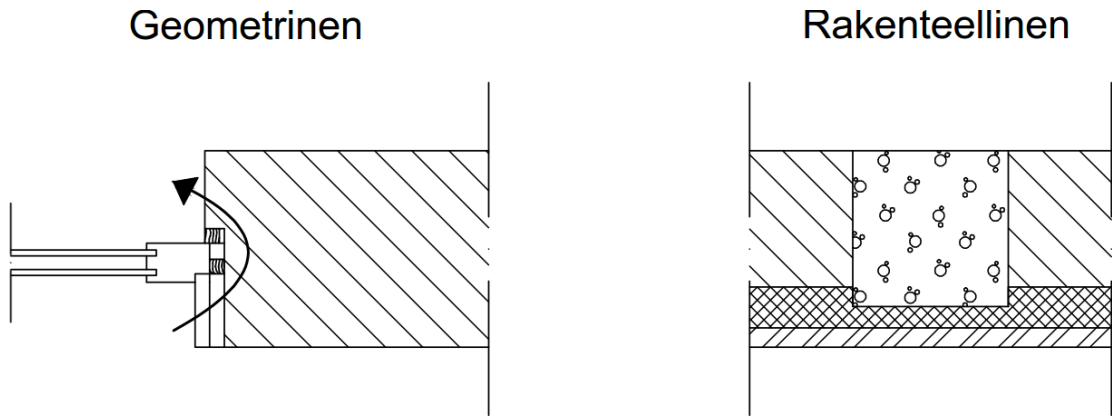
$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (2.5)$$

jossa d (m) on materiaalikerroksen paksuus ja λ (W/(m·K)) on aineen lämmönjohtavuus. Monikerroksiselle rakenteelle lämmönvastus on

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}, \quad (2.6)$$

eli lämmönvastus on eri kerrosten lämmönvastusten summa. [6, s. 17, 19]

Kylmäsilillä tarkoitetaan rakenteessa kohtaa, johon syntyy kaksi- tai kolmidimensioisia lämpövirtoja. Kylmäsiltojen kohdalla tapahtuu suurempia lämpöhäviöitä kuin ympäröivästä rakenteesta. Lisäksi rakennuksen sisäpuolella kylmäsilan kohdalla olosuhteet reagoivat herkemmin ulkolämpötilaan. Kylmäsiltoja esiintyy kahden tyyppisiä: geometrisia ja rakenteellisia. Geometrisia kylmäsiltoja ovat esimerkiksi seinien nurkat ja ikkunoiden pielet. Rakenteellisia kylmäsiltoja ovat esimerkiksi teräksiset tai betoniset kannakkeet, jotka aiheuttavat epäjatkuvuutta eristyskerrokseen. Kylmäsiltoja on havainnollistettu kuvassa 2.2. [7, s. 91]



Kuva 2.2 Geometrinen ja rakenteellinen kylmäsilta.

Lämpökapasiteetti kuvaa kappaleen kykyä sitoa itseensä lämpöenergiaa. Aineeseen varastoituva tai siitä poistuva lämpöenergia Q (J) on

$$Q = mc\Delta T, \quad (2.7)$$

jossa m (kg) on massa, ΔT (K) lämpötilan muutos ja c (J/(kg·K)) ominaislämpökapasiteetti. Rakennusten kannalta lämpökapasiteetti vaikuttaa sisälämpötilan muutosnopeuteen varastoimalla tilan yllilämpöä ja hidastamalla lämpenemistä. Lämpötilan laskiessa rakenteet taas luovuttavat kertynyttä lämpöä. Tasaavan vaikutuksen suuruuteen ja nopeuteen vaikuttaa rakenteiden kyky siirtää lämpöä itsensä ja ympäristön välillä. [5, s. 58–59]

Rakenteiden kykyyn siirtää lämpöä itsensä ja ympäristön välillä vaikuttavat terminen diffusiviteetti α (m²/s) ja lämpenemiskerroin b (W·√s/(m²·K)). Terminen diffusiviteetti α kuvaa lämpötilan muutoksen nopeutta materiaalissa, ja se lasketaan kaavasta

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (2.8)$$

jossa ρ on aineen tiheys (kg/m³) c (J/(kg·K)) ominaislämpökapasiteetti ja λ (W/(m·K)) lämmönjohtavuus. Materiaalin lämpenemiskerroin b (W·√s/(m²·K)) lasketaan

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}} \quad (2.9)$$

Materiaalin lämpenemiskerroin kuvaa materiaalin kykyä absorboida lämpöä ja toisaalta lämmönvarastointikykyä. [4, s. 16, 25]

2.1.2 Konvektio

Konvektio siirtää lämpöä materiaalin pinnalta virtaavan aineen mukana. Konvektiota tapahtuu avoimien pintojen lisäksi ilmapäleissä, kuten tuuletetuissa yläpohjissa ja tuuletusräoissa. Mikäli eriste on harvaa, saattaa eristeessä tapahtua sisäistä konvektiota. [4, s. 43, 58, 62]

Konvektiosta aiheutuva lämpövirran tiheys q_c (W/m^2) lasketaan

$$q_c = h_c(T_s - T_a), \quad (2.10)$$

jossa h_c ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, T_a (K) ympäröivän ilman lämpötila ja T_s (K) materiaalin pintalämpötila. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin riippuu tason suunnasta, sekä siitä, onko konvektio pakotettua vai luonnollista. Pakotettu konvektio tarkoittaa, että jokin ulkoinen voima, esimerkiksi tuuli, aiheuttaa ilman virtaamisen [3, s. 41]. Pakotetussa konvektiossa konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan laskea kaavoilla (2.11) ja (2.12) vaakasuorille pinnoille, kun ilmavirran suunta on vaakatasossa.

$$h_c = 6 + 4v_a, \quad v_a \leq 5 \text{ m/s} \quad (2.11)$$

$$h_c = 7,41v_a^{0,78}, \quad v_a \geq 5 \text{ m/s}, \quad (2.12)$$

Jossa v_a on ilmavirran nopeus. Pakotetussa konvektiossa ilmavirran ollessa kohtisuorassa pystysuorille pinnoille h_c lasketaan kaavalla (2.13) ja seinästä poispäin kaavalla (2.14).

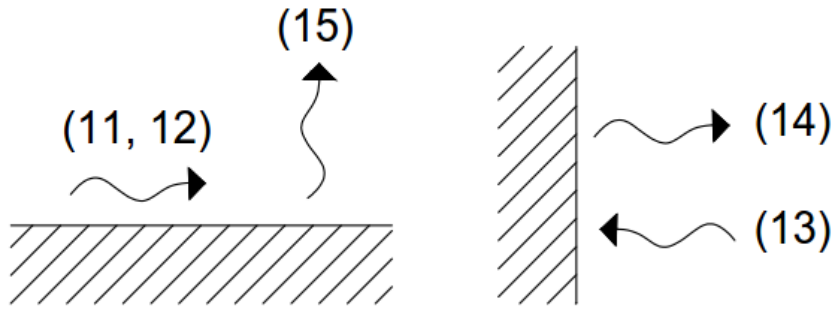
$$h_{cv} = 5 + 4,5v_a - 0,14v_a^2, \quad v_a \leq 10 \text{ m/s} \quad (2.13)$$

$$h_{cv} = 5 + 1,5v_a, \quad v_a \leq 8 \text{ m/s} \quad (2.14)$$

jossa v_a on ilmavirran nopeus. Luonnollisessa konvektiossa vaakasuorasta pinnasta suoraan ylöspäin h_c lasketaan kaavalla (2.15)

$$h_{cv} = 2|T_a - T_s|^{1/4}, \quad v_a \leq 8 \text{ m/s} \quad (2.15)$$

jossa v_a on ilmavirran nopeus. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu tilanteita, joissa kaavoja (2.11–2.15) käytetään. [4, s. 43–44]



Kuva 2.3 Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen laskenta kaavoilla (2.11–2.15).

Ilmanvuotoluku n_{50} (1/h) ilmaisee kuinka monta kertaa rakennuksen koko ilmatilavuus vaihtuu rakennuksen vaipan vuotojen seurauksena tunnissa, paine-eron ollessa 50 Pa. Ilmanvaihtokoneiden kautta kulkeutuvaa ilmavirta ei ole vuotoilmaa. Ilmanvuotoluvulla q_{50} ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) kuvataan keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa, paine-eron ollessa 50 Pa. Näiden kahden ilmanvuotoluvun suhde toisiinsa on

$$q_{50} = \frac{n_{50}V}{A}, \quad (2.16)$$

jossa A (m^2) on vaipan pinta-ala aukkoineen ja V (m^3) rakennuksen ilmatilavuus. [7, s. 14–15] Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osan D3 (2012) mukaan rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} saa olla enintään $4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. [9, s. 10].

Paine-eroja rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välille aiheuttavat esimerkiksi tuuli, savupiippuilmio ja koneellinen ilmanvaihto. Savupiippuilmio tarkoittaa tilannetta, jossa lämpimän ilman kohotessa korkean seinän yläosassa on ylipainetta ja alaosassa alipainetta. [8, s. 8–9]

2.1.3 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella emittoivat säteilyä. Rakennusfysiikan kannalta olennaista lämpösäteilyä on kahta tyyppiä: Auringon lyhytaaltainen lämpösäteily ja kappaleiden pitkäaaltainen lämpösäteily. Aallonpituudella on merkitystä kun tarkastellaan ikkunan läpi siirtyvää lämpömäärää, sillä ikkuna läpäisee hyvin lyhytaaltoista säteilyä, mutta ei pitkäaaltoista. Tämän seurauksena lyhytaaltainen auringon lämpösäteily pääsee ikkunasta sisään, mutta kappaleiden emittoima lämpösäteily ei pääse ikkunasta ulos muuten kuin johtumalla. [5, s. 40]

Musta pinta on ideaalinen pinta. Se imee itseensä kaiken säteilyn eikä siitä heijastu säteilyä. Niin kutsuttu harmaa kappale vastaa todellisia kappaleita. Emissiiviteetti ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) kuvaa pinnan säteilytehon suhdetta ideaalisen mustan pinnan säteilytehoon. Emissiiviteetti riippuu materiaalista, pinnoitteesta ja hieman myös materiaalin lämpötilasta. [10, s. 452–453]

Pinnan emittoima kokonaisenergia E (W/m^2) voidaan laskea Stefan-BolzmANNin lain avulla

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (2.17)$$

jossa T_s (K) on tarkasteltavan pinnan lämpötila, ε (-) emissiiviteetti ja $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ on Stefan-BolzmANNin vakio. Pinnan ja ympäristön välillä siirtyvälle säteilyenergialle q_{rad} (W/m^2) voidaan muodostaa kaava

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4), \quad (2.18)$$

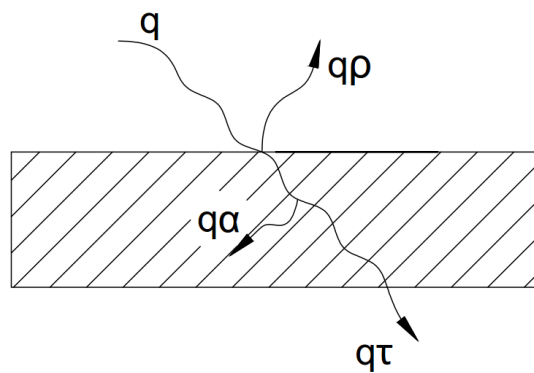
jossa T_{sur} (K) on ympäristön lämpötila. Pinnasta säteilemällä emittoituva nettosäteilylämpövirta Φ_{rad} (W) saadaan

$$\Phi_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} A (T_s - T_{\text{sur}}) = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4), \quad (2.19)$$

jossa h_{rad} ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$) on säteilyn lämmönsiirtokerroin ja A (m^2) pinta-ala. [11, s. 9–11]

Säteily, tai osa siitä, voi absorboitua pintaan, jolloin materiaalin lämpöenergia kasvaa. Absorboituneen ja pintaan tulevan säteilyenergian suhdetta kuvataan absorptiokertoimella α ($0 \leq \alpha \leq 1$). Absorptiokerroin riippuu pintamateriaalista ja pintaan tulevasta säteilystä, esimerkiksi Auringon lämpösäteilylle ja pitkäaaltoiselle harmaan kappaleen säteilylle absorptiokerroin voi olla erilainen. Harmaille pinnoille voidaan olettaa että $\alpha = \varepsilon$. [11, s. 10]

Säteilyn osuessa pintaan, se joko heijastuu, absorboituu tai läpäisee materiaalin. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Heijastuminen, absorptio ja läpäisy [4, s. 47].

Absorption, heijastuksen ja läpäisyn osuuksien summa on aina yksi

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (2.20)$$

jossa α (-) on absorptiokerroin, ρ (-) on heijastuskerroin ja τ (-) läpäisykerroin. Lasi on rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa poikkeuksellinen, sillä yleensä materiaalin ei katsota päästävän säteilyä lävitseen. Lasin läpi pääsee kuitenkin ainoastaan lyhytaaltoista säteilyä. [4, s. 46, 48]

Auringon säteilyä saapuu pinnalle suorana säteilynä sekä hajasäteilynä. Hajasäteily on Auringosta lähdettyään ja ennen pinnalle saapumista sirottunutta tai heijastunutta säteilyä. Sironta vähentää säteilyn intensiteettiä. Suoran säteilyn määrään vaikuttaa muun muassa pilvisyys ja auringon korkeuskulma, joka kuvaa kulmaa Auringon ja horisontin välillä tarkastelupisteessä. Pieni auringon korkeuskulma tarkoittaa sitä, että säteilyn on matkattava pidempi matka ilmakehässä ennen pintaan osumista, kuin jos Aurinko paistaisi kohtisuoraan zeniitistä. Pidempi matka ilmakehässä taas tarkoittaa enemmän sirontaa, joka vähentää säteilyn intensiteettiä. [10, s. 486]

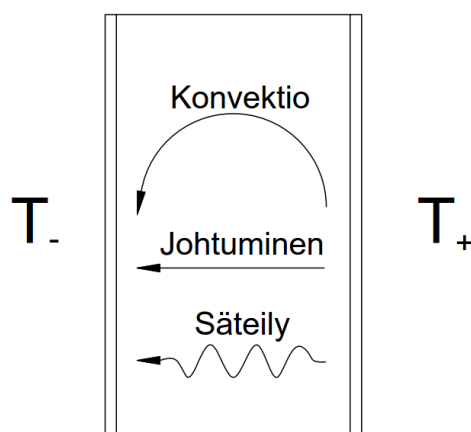
Auringonsäteilystä kappaleeseen kohdistuva lämpövirran tiheys q (W/m^2) on

$$q = I_{\text{sol},N} \alpha_{\text{sol}} \cos(\nu) = I_{\text{sol}} \alpha_{\text{sol}}, \quad (2.21)$$

jossa $I_{\text{sol},N}$ (W/m^2) on Aurinkoon nähden suorassa kulmassa olevaan pintaan saapuva säteily, α_{sol} (-) pinnan absorptiokerroin auringonsäteilylle, ν ($^\circ$) säteilyn lankeamiskulma sekä I_{sol} (W/m^2) tasoon saapuvan säteilyn intensiteetti. [4, s. 48]

2.1.4 Lämmönsiirtymismuotojen yhdistelmät

Tuulettumattomassa ilmapälissä lämpöä siirtyy kolmessa eri muodossa: johtuen, säteillen ja konvektiivisesti. Kuva 2.5 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 2.5 Lämmön siirtyminen tuulettumattomassa ilmapälissä. [4, s. 58]

Lämpövirta Φ (W) rakenteen läpi on kaikkien lämmönsiirtymismuotojen summa, jolloin

$$\Phi = (h_{cv} + h_{rad} + h_{cd})A(T_+ - T_-), \quad (2.22)$$

jossa h_{cd} (W/(m²K)) on johtumisen lämmönsiirtokerroin, T_+ sisälämpötila ja T_- ulkolämpötila. Ilmalle h_{cd} on

$$h_{cd} = \frac{\lambda_a}{d}, \quad (2.23)$$

jossa λ_a (W/(mK)) on ilman lämmönjohtavuus. [4, s. 58–59]

Pintojen lämmönvastukset R_{se} ((m²K)/W) ja R_{si} ((m²K)/W) riippuvat ympäristön oloista. Lämmönsiirtokerroin h_e on pinnan konvektiivisen ja radiatiivisen lämmönsiirtoker toimien summa.

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_{rad} + h_{cv}} \quad [4, s. 54, 57]. \quad (2.24)$$

Ympäristön tila saattaa vaihdella, mutta pintojen lämmönvastuksille on määritetty vakioarvot Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. RakMK osan C4 (2003) mukaan pintojen lämmönvastukset ovat taulukossa 2.1 esitetyt arvot. R_{se} on ulkoilmaan rajoittuvan rakennusosan ulkopuolen ja R_{si} sisäpuolen pintavastus. Sisäpuolen pintavastukseen vaikuttaa lämpövirran suunta.

Taulukko 2.1 Sisä- ja ulkopuolen pintavastukset [7, s. 16].

Lämpövirran suunta	vaakasuora	ylöspäin	alaspäin
R_{si} (m ² ·K)/W	0,13	0,10	0,17
R_{se} (m ² ·K)/W	0,04	0,04	0,04

Taulukosta 2.1 saadaan pintavastuksien väliarvoja lineaarisella interpoloinnilla eri kulmille. [7, s. 16]

2.2 Rakennuksen energiantarve

Tässä luvussa käydään läpi energian tarpeeseen vaikuttavia asioita rakennussuunnittelun, rakenteiden sekä lämpö-, vesi-, ilmanvaihto-, ja sähkötekniikan näkökulmasta. Sähkötekniikasta tarkastellaan vain valaistusta. Alaluvuissa on esitetty myös osa asetusten vaatimista vähimmäisarvoista olosuhteille. Lukijan on syytä huomata että luvussa 2.3 määritetään standardikäyttö, jota käytetään määräystenmukaisuuden osoittamisessa. Standardikäyttö poikkeaa tässä luvussa esitetyistä vaatimuksista. Tämän luvun tarkoitus on valaista rakennuksen todellisen energiankulutuksen muodostumista. Energiankulutuksella tarkoitetaan tässä työssä järjestelmien ja laitteiden käyttämää energiaa, joka on lämpöenergiaa, sähköenergiaa tai polttoainetta.

Rakennussuunnittelulla luodaan pohjaa rakennuksen energiankulutukselle. Rakennuksen sijoittelu maastossa vaikuttaa rakennuksen energiankulutukseen. Rakennuksen ympärille syntyy mikroilmasto: lämpötila voi olla kylmempi laakson pohjalla tai tiiviisti rakennetussa ympäristössä ympäröivät rakennukset luovuttavat lämpöä, mikä nostaa ulkoilman lämpötilaa. Rakentamisen tiheydellä on vaikutusta myös tuulioloihin, jotka taas vaikuttavat rakennuksen paineoloihin. Rakennuksen muoto vaikuttaa energiatehokkuuteen. Tehokkain muoto saadaan, kun tilavuuden suhde on mahdollisimman suuri vaipan pinta-alaan nähden. Rakennuksille tällainen muoto on käytännössä kuutio. Ikkunoiden koko, suuntaus ja varjostus vaikuttavat sisälle tulevan lämpösäteilyn ja luonnonvalon määrään. [12, s. 32–33]

Muutamissa tutkimuksissa [13, 14, 15] on tutkittu Suomen palvelurakennusten energiankulutusta. Espoon kouluille ja päiväkodeille tehdyssä tutkimuksessa [13] tutkittiin vuoden 2000 jälkeen rakennettuja rakennuksia. Tutkimuksessa huomattiin, että uudet rakennukset eivät välttämättä olleet energiatehokkaampia kuin vertailujoukko, ellei energiatehokkuuteen kiinnitetty erityistä huomiota jo suunnitteluvaiheessa. Sähkönkulutus rakennuksittain oli vaihtelevaa. Syynä tähän saattaa olla vaihteleva määrä elektronisia laitteita. Tutkimuksessa korostetaan käyttäjän roolin merkitystä energiankulutuksessa.

Toinen Espoon opetusrakennuksille tehty tutkimus [14] vertailee uuden ja vanhan opetusrakennuskannan eroja. Otanta oli 82 % Espoon kouluista, 68 % päiväkodeista ja kaikki yliopistorakennukset. Vertailussa kävi ilmi, että uudet koulu- ja päiväkotirakennukset kuluttivat selvästi vähemmän lämmitysenergiaa, mutta uudemmat rakennukset toisaalta käyttivät hieman enemmän sähköä. Rakennuksen muotokertoimella A/V ei ollut ilmeistä vaikutusta energiankulutuksen kannalta.

Valtioneuvoston sektoritutkimuksen neuvottelukunnan raportissa [15] on huomattu että lämmönkulutus rakennustilavuutta kohti laskee kouluissa oppilasmäärän kasvaessa sähkön kulutuksen pysyessä lähes samana. Sähkönkulutus rakennustilavuutta kohti on suurempaa uudemmissa rakennuksissa. Raportissa tutkittujen koulujen energiankulutuksen tunnuslukuja on nähtävillä taulukossa 2.2. [15, s. 15, 18]

Taulukko 2.2 *Esimerkkikouluotoksen tilavuutta kohti laskettu energiankulutus vuonna 2006. Kohteita otoksessa oli 189. [15, s. 13, 56]*

Tunnusluku	Sähkönkulutus (kWh/m ³)	Lämmönkulutus (kWh/m ³)	Energiankulutus yhteensä (kWh/m ³)
Keskiarvo ja keskihajonta	12,4 ± 3,4	45,6 ± 11,2	58,0 ± 12,6
Mediaani	11,8	42,8	55,6

Päiväkotien lämpöenergian kulutus vaikuttaa pienenevän rakennustilavuuden kasvaessa sähköenergian kulutuksen pysyessä suunnilleen samana [15, s. 25]. Taulukossa 2.3 on esitetty päiväkotiotoksen energiankulutuksen tunnuslukuja. Taulukosta huomataan

että lämmönkulutuksen hajonta on lähes neljännes keskiarvosta. Otoksen kaikkien tunnuslukujen keskiarvo on myös mediaania suurempi.

Taulukko 2.3 *Esimerkkipäiväkoti-otoksen tilavuutta kohti laskettu energiankulutus vuonna 2006. Kohteita otoksessa oli 199. [15, s. 56]*

Tunnusluku	Sähkönkulutus (kWh/m ³)	Lämmönkulutus (kWh/m ³)	Energiankulutus yhteensä (kWh/m ³)
Keskiarvo ja keskihajonta	22,6 ± 5,9	66,7 ± 15,8	89,4 ± 18,6
Mediaani	21,4	62,8	86,4

Lämmitystarvelukujen avulla voidaan vertailla tilojen lämmitysenergian kulutusta eri paikkakunnilla ja eri vuosina. S17 (K-d) lämmitystarveluku lasketaan +17 °C oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksena. Lukuun ei lasketa mukaan päiviä, jolloin keskilämpötila on ulkona keväällä yli +10 °C tai syksyllä yli +12 °C. [16] RakMK D3 (2012) liitteen 2 mukaisia säätietoja käytetään E-luvun laske-
miseksi, mutta todellisen energiankulutuksen suhteuttamisessa voidaan käyttää kyseisen vuoden lämmitystarvelukuja paikkakunnittain. Vertailuarvona käytetään Helsinki-Vantaan lämmitystarvelukua, joka perustuu mittauksiin 1980–2009 [9]. Vertailuarvo jaetaan paikkakunta-kohtaisella lämmitystarveluvulla, ja tällä suhdeluvulla kerrotaan lämmitysenergian kulutuksen todellinen arvo. Näin saadaan vertailukelpoinen lämmitysenergian kulutus. Lämmitystarveluvut ovat saatavilla Ilmatieteenlaitoksen verkkosivuilla [16].

2.2.1 Lämpöolot

RakMK osassa D2 (2012) sanotaan, että oleskeluvyöhykkeellä suunnittelu-
arvona käytetään yleensä lämmityskaudella 21 °C ja kesäkaudella 23 °C. Yhden asteen vaihtelu sallitaan huonetilan keskellä 1,1 metrin korkeudella. Oleskeluvyöhyke ulottuu lattiasta 1,8 metrin korkeuteen ja rajautuu sivusuunnassa 0,6 metrin päähän seinistä. [17, s. 5]

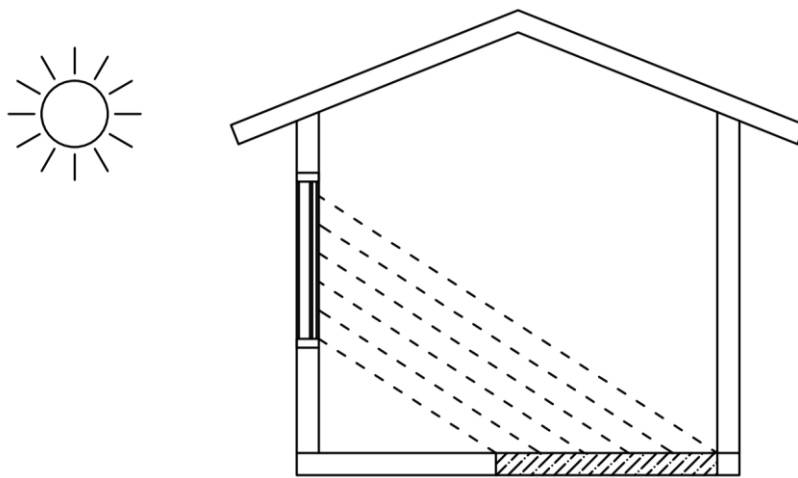
Asumisterveysasetuksen 545/2015 liitteen 1 mukaan lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja muissa vastaavissa tiloissa huonelämpötila lämmityskaudella tulee olla +20 °C – +26 °C ja lämmityskauden ulkopuolella +20 °C – +32 °C. [18] Sisätilan lämpötilanmuutos yhdellä asteella vaikuttaa tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutukseen noin 5 % [12, s. 200].

Jäähdytystä voidaan tehdä passiivisesti rakenteilla, mikä vähentää jäähdytystarvetta. Ikkunoiden suuntaukseen ja aurinkosuojaukseen liittyvät ratkaisut ovat näistä tärkeimpiä. [12, s. 210] Näitä ratkaisuja on käsitelty lisää kappaleessa 2.2.2. Jäähdytyslaitteita taas on käsitelty kappaleessa 2.2.4.

Lämpökapasiteetti kuvaa rakenteen kykyä sitoa lämpöenergiaa. Lämpöenergiaa voidaan sitoa sitä enemmän rakenteisiin, mitä enemmän lämpötilan sallitaan vaihdella.

Käytännössä tämä tarkoittaa jäähdytyksen vähentämistä kuumina päivinä ja lämmityksen vähentämistä öisin. [5, s. 58]

Massiivisen seinän ulko-osa sitoo Auringosta säteillettä lämpöä, mikä vähentää lämpövirtaa rakenteen sisäpuolelta ulospäin, ja lämpötilan kohotessa riittävästi lämpöä voi alkaa siirtyä ulkoa sisälle päin. Vaikutus näkyy sisäpuolella kuitenkin viiveellä. Optimaalinen tilanne on sellainen, jossa viive on niin suuri, että päivällä ulkoseinään kertynyt lämpö siirtyy sisätilaan yöllä ilman viillettyä. Toisaalta taas yöllä viilentynyt ulkoseinä viilentää sisätiloja päiväsaikaan. Toinen vaikutus massiivisuudella on sisäseinien varastoituneen lämmön vapautuminen sisälämpötilan laskiessa. Sisäpuolen rakenteisiin varastoituu lämpöä Auringon lämmittäessä päiväsaikaan ikkunoiden läpi huoneen sisäosia, kuten nähdään kuvassa 2.6. [12, s. 203]



Kuva 2.6 Auringon lämpösäteily lämmittää sisäpuolen rakenteita.

VTT:n mallintamalla tekemässä tarkastelussa rakenteiden massiivisuudella ei juuri ollut vaikutusta lämmitysenergian kulutukseen. Tarkastelussa on verrattu rakentamismääräyskokoelman mukaista pientalon ja matalaenergiapientalon lämmitysenergian tarvetta Suomen ilmastossa kevytrakenteisena ja massiivisena. Mallinnusohjelmana käytettiin IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) -ohjelmaa. Lämmitystarpeen ero kevytrakenteisen ja massiivisen talon välillä oli 1,5–2,5 kWh/m². Massiivisuuden vaikutusta suurempi vaikutus saatiin aikaan ikkunan g-arvon muutoksella 0,68:sta 0,3:een, mikä lisäsi lämmitystarvetta 5,3–5,5 kWh/m². [20]

Vastaavaan tulokseen termisen massan vaikutuksesta lämmitysenergian kulutukseen on päädytty myös Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions -hankkeessa (FRAME-hankkeessa). Lämmityksen nettotarve oli noin 4 % pienempi raskasrakenteisella, kuin kevytrakenteisellä toimistorakennuksella. Vastaava luku pientaloille on 3 % ja kerrostaloille 10 %. Jäähdytystarpeessa saatiin 2–15 % ero toimistorakennuksille, 9–42 % pientaloille ja 5–31 % kerrostaloille, riippuen vaipan lämmöneristysentasosta ja yötuuletuksen käytöstä. Termisen massan vaikutus jäähdytysenergiaan on suurempi, kun yötuuletuksella ei käytetä. [21, s. 304–306]

2.2.2 Ikkunat ja aurinkosuojaus

Ikkunoiden varjostus, koko ja suuntaus rakennuksessa vaikuttavat sisälle tulevaan auringonsäteilyn määrään. Kevät- ja syyskaudella sisälle tuleva lämpösäteily vähentää lämmitystarvetta. Kesäaikaan kuitenkin suuri määrä säteilyä voi lisätä jäähdytystarvetta. Kesäaikaista yllämpöä voidaan ehkäistä aurinkosuojauksella. Lämmityskaudella ikkunoita ei kuitenkaan kannata suojata täysin Auringolta, sillä muuten tarve lämmitysenergialle kasvaa. [12, s. 33, 210]

Ikkunalasin valinnalla voidaan vaikuttaa lämmön- ja ääneneristävyyteen, turvallisuuteen sekä valonläpäisevyyteen. Ikkunan lämmöneristävyys perustuu lähinnä kaasun lämmöneristävyyteen lasien välissä. Ikkunan lämmöneristävyys voidaan parantaa käyttämällä selektiivilasia, käyttämällä täytekaasuja lasien välissä, optimoimalla lasien etäisyydet tai valitsemalla eristävämpi välilistan materiaali. Selektiivipinnoite, eli matalaemissiiviteettipinnoite, vähentää kirkkaana yönä ikkunan ulkopinnalta poistuvaa lämpösäteilyä. Lasien lisääminen kasvattaa myös lämmöneristävyyttä. [12, s. 35, 321]

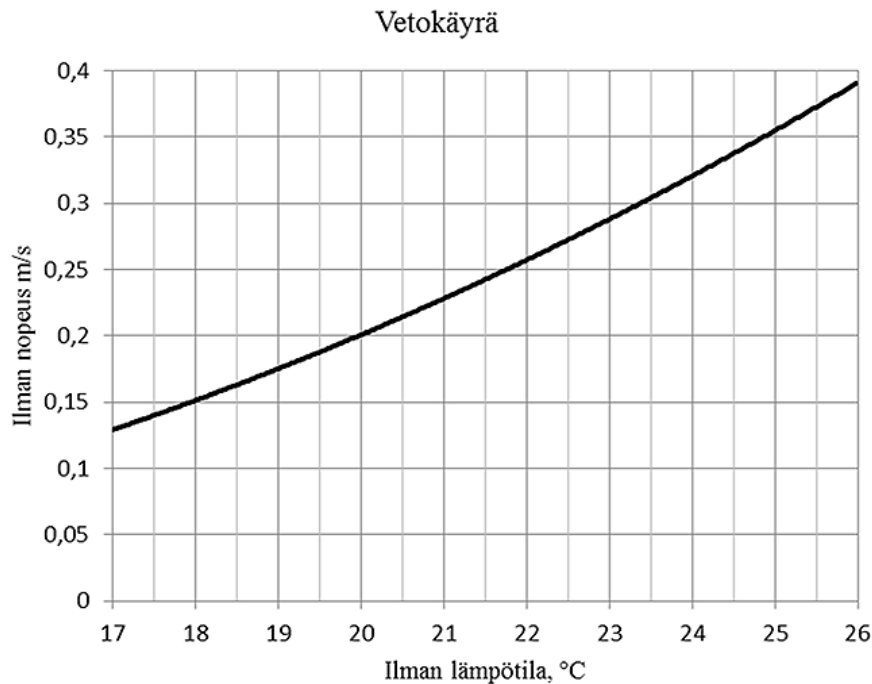
Auringonsuojalaseilla voidaan vähentää Auringon lyhytaaltoisen säteilyn läpäisyä, mutta tämä vähentää myös näkyvän valon läpäisyä. Ikkunan lasiosan auringonsäteilyn kokonaisläpäisyä kuvaa g-arvo, joka on suhdeluku välillä 0–1. Nolla tarkoittaa, että säteilyä eikä absorboitunutta lämpöä pääse lainkaan ikkunan läpi. Tyypillisesti ikkunoiden g-arvo on 0,3–0,6. [12, s. 34, 321]

Aurinkosuojausjärjestelmät voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: sisäpuoliseen, ulkopuoliseen sekä integroituun suojaukseen. Aurinkosuojausjärjestelmä voidaan automatisoida, mikä kasvattaa suojauksesta saatavia hyötyjä, ja automatisointi voidaan asettaa suojaamaan järjestelmää tuulivaurioilta. Automatisoinnissa käytetään apuna erilaisia antureita, jotka tunnistavat aurinkosuojauksen tarpeen, ja toisaalta aurinkosuojan rikkoutuminen voidaan estää tuulisella säällä tuulta havaitsevilla antureilla. [22, s. 40–41, 44–46]

2.2.3 Ilmanvaihto ja vuotoilma

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 545/2015 sanotaan että kouluissa, päiväkodeissa ja muissa vastaavissa oleskelutiloissa käytönaikainen ulkoilmavirta on oltava vähintään $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden. Ulkoilmavirta voidaan vähentää aina $4 \text{ dm}^3/\text{s}$ asti henkilöä kohden, mikäli epäpuhtauspitoisuudet ja lämpötila eivät aiheuta terveyshaittaa eikä ilmankosteus nouse niin suureksi, että se aiheuttaisi mikrobikasvun riskiä. Mikrobikasvun riskiä ei saa ilmetä myöskään suuremmilla ilmavirroilla. Hiilidioksidin määrä ilmassa ei saa olla yli $2100 \text{ mg}/\text{m}^3$:a suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. Ilman virtausnopeudelle on myös annettu enimmäismäärät eri lämpötiloissa, kuten nähdään kuvassa 7. Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdon tulee olla sellainen,

että sisäilmaan ei kerro niin paljoa epäpuhtauksia, että se aiheuttaisi terveyshaittaa käyttöaikana. [19]



Kuva 2.7 Ilman virtausnopeuden ylärajat eri lämpötiloissa [19].

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan vähentää ilmamääriä ja siten energiankulutusta. Ohjauksella on suuri säästövaikutus palvelurakennuksissa, koska niissä on vaihteleva kävijämäärä. Ilmamääriä voidaan ohjata kellokytkimillä, läsnäoloantureilla, lämpö- tai hiilidioksidiohjauksella. [12, s. 203]

Useat koulurakennukset ovat kesällä suljettuja, eikä varsinaista jäähdytysjärjestelmää välttämättä rakenneta ollenkaan. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan välttää ylikuumeneminen. Kriittistä aikaa jäähdytyksen kannalta ovat toukokuu ja elokuun puolivälin syyskuun puolivälin välinen aika. Tietokoneluokat ja muut tilat, joissa on suuria lämpökuormia, saattavat vaatia jäähdytysjärjestelmän. [23, s. 92]

Rakennuksen hyvällä ilmatiiviydellä saavutetaan useita etuja. Hyvä ilmatiiviyys vähentää energiankulutusta, vedontunnetta ja kovan sisäilman virtausta rakenteisiin. Myöskään rakenteissa olevat mikrobit ja epäpuhtaudet eivät pääse yhtä herkästi sisäilmaan tiiveyden ollessa hyvä ja paineistuksen ollessa sopiva. Ilmanvaihdon toimivuus ja energiatehokkuus paranee, kun ilma kulkee lämmöntalteenoton kautta eikä hallitsemattomasti vuotokohdista. [23, s. 24]

Tiiveysmittauksella voidaan selvittää rakennuksen ilmanpitävyys. Tyypillisesti koe tehdään käyttäen erillistä painekoelaitteistoa. Ennen koetta rakennuksen tarkoitukselliset aukot tiivistetään sekä ulko-ovet ja ikkunat suljetaan. Rakennukseen luodaan pai-

ne-ero puhaltimella. Puhaltimen kautta virtaava ilma mitataan ja ilman tilavuusvirrasta lasketaan ilmanvuotoluku. [12, s. 373–374]

2.2.4 Talotekniikka

Kaukolämpöalueilla useimmat suuret rakennukset liittyvät kaukolämpöverkkoon. Kaukolämmön vaihtoehtoja ovat sähkölämmitys, erilaiset pumput ja erilaiset polttokattilat. Lämpöpumpuista on lisää tietoa alaluvussa 2.2.5. Patterilämmitys on suurien lämpökuormien vuoksi palvelurakennuksissa suuren osan käyttöajasta kylmänä. Lattialämmitys voidaan hoitaa sähkövastuksilla tai lämpimän veden kierrätyksellä. Ilmanvaihtolämmityksessä lämmönsiirto ja -luovutus tapahtuvat ilmanvaihtokanavia pitkin. Lämpötilaa ohjataan termostaateilla ja säätimillä. [12, s. 206–209]

Lämpimän käyttöveden lämpötilan tulee olla +55 °C ja +65 °C välillä. Vesi lämmitetään kaukolämmöllä, kattilalaitoksella tai sähköllä. Sähköä tosin käytetään veden lämmittämiseen vain pientaloissa ja tilapäisesti käytössä olevissa rakennuksissa. [19, s. 213–214]

Ilmastoinnin tehtävä on ylläpitää sopivia lämpöoloja ja hyvää ilmanlaatua rakennuksessa. Ilmanvaihtojärjestelmä koostuu ilmanvaihtokoneesta, ilmanvaihtokanavista ja ilmanjakolaitteista huoneissa. Ilmanvaihto voidaan toteuttaa laminaarisesti, sekoittavana tai syrjäyttävänä. Ilma voidaan jakaa ilmanvaihtokoneelta vakiovirtana, jolloin kaikkiin huoneisiin johdetaan ilmaa samassa lämpötilassa. Monivyöhykejärjestelmällä voidaan säätää huonekohtaista tuloilman lämpötilaa. Ilman lämpötila säädetään puhaltimen jälkeen, minkä jälkeen ilma ohjataan oikeille vyöhykkeille. Myös ilmavirtasäätöinen ilmanvaihto on mahdollinen. Lämmöntalteenotto (LTO) tapahtuu lämmittämällä tuloilmaa poistoilmalla. Lämmönsiirtopinta-ala määrittää usein lämmöntalteenoton tehon. [19, s. 183, 188, 190, 193, 200–201]

Jäähdytystarve voidaan kattaa koneellisella jäähdytyksellä tai vapaajäähdytyksellä. Koneellisessa jäähdytyksessä jäähdytysteho tuotetaan sähkön avulla kompressorikylmälaitteella. Apulaitteet, kuten puhaltimet ja pumput käyttävät sähköä. Toinen koneellinen jäähdytysvaihtoehto on absorptiojäähdytys. Absorptiojäähdytyksessä jäähdytysenergia tuotetaan lämpöenergian avulla. Absorptiojäähdytys on edullinen ratkaisu kun käytettävissä on riittävän korkealämpötilaista jätelämpöä. Vapaajäähdytyksessä taas hyödynnetään ulkoilmassa, vesistöissä tai maaperässä jäähdytettyä kiertonestettä. Myös viileämmän ulkoilman tuominen sisätiloihin katsotaan vapaajäähdytykseksi. Maaperän käyttö kiertonesteen viilentämiseen soveltuu hyvin rakennuksiin, joissa on maalämpöpumppu. [12, s. 210–211]

Valaistuksen energiankulutukseen vaikuttavat käytetyt laitteet, valaistuksen suunnittelu ja keinovalon käytön määrä suhteessa luonnolliseen valoon. Energiankulutukseen voidaan vaikuttaa myös valon säätämisellä päivänvalon määrän mukaan tai läsnäolon

mukaan. Valaistusvoimakkuusvaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 12464-1. [12, s. 213]

2.2.5 Uusiutuvan energian pientuotanto

Yksi tapa parantaa rakennuksen energiatehokkuutta on lisätä rakennukseen energian pientuotantoa. Suurista tuotantolaitoksista saatavan energian lisäksi voidaan energiaa tuottaa pienemmissä lähialueen yksiköissä. Lähialueella voidaan tuottaa energiaa uusiutuvilla polttoaineilla, tuuli-, vesi-, aurinkovoimalla tai lämpöpumppuratkaisuilla. Tuotettu energia voi olla sähköä, lämpöä tai kylmää. [1, s. 10–11] Omavaraisenergiaksi lasketaan kuitenkin vain kiinteistöön kuuluvien laitteiden tuottama energia [25, s. 7].

Auringosta saatavaa energiaa voidaan tuoda rakennukseen sähköinä tai lämpönä. Aurinkotorni toimii siten, että suuri alue aurinkotornin ympärillä katetaan läpinäkyvillä levyillä. Ilma levyjen alla lämpenee, kohoaa ylöspäin ja kasvattaa painetta, joka pyörittää tornin sisällä olevaa turbiinia. [5, s. 26] Aurinkokennot ovat elektronisia puolijohteita ja niiden materiaalina käytetään piitä. Auringon säteet saavat aikaan kennossa sähköjännitteen. Aurinkokennojen hyötysuhde on noin 12–17 % riippuen olosuhteista ja paneelin ominaisuuksista. Aurinkokeräimillä kerätään lämpöä, joka voidaan käyttää lämpimän käyttöveden tuottamiseen ja tilojen lämmittämiseen. Aurinkokeräimien hyötysuhde laskee keräimen lämpötilan noustessa. Loiva asennuskulma (30°) tuottaa eniten energiaa keskikesällä, ja jyrkempi asennuskulma (45–60°) on optimoitu syys- ja kevätkaudelle. [1, s. 38–40, 42–43]

Lämpöpumppujärjestelmät luokitellaan lämpöenergianottotavan mukaan ilma-, maa-, poistoilma- ja ulkoilma-vesilämpöpumppuihin. Sähköllä toimivan kompressorin avulla siirretään lämpöä höyrystimen ja lauhduttimen välillä. Höyrystimessä kylmäaine sitoo lämpöä olomuodonmuutoksessa höyryksi. Lämpö vapautuu kylmäaineen palautuessa nesteeksi lauhduttimessa. Kerätty lämpö voidaan pumpusta riippuen käyttää tilojen tai veden lämmittämiseen. Maalämpöä voidaan kerätä erikseen maahan tai veteen asennettavien keruupiirien lisäksi energiapaaluilla. Energiapaaluja käytetään kohteissa, jotka paalutetaan joka tapauksessa. Energiapaalut asennetaan poraamalla tai lyömällä, ja ne toimivat samalla perustusrakenteina. Paalupituuden tulee olla yli 15 metriä. [1, s. 49–52, 56–57]

Tuulivoimaa voidaan hyödyntää parhaiten tuulisilla alueilla. Tuulivoimala tarvitsee käynnistyäkseen vähintään tuulennopeuden 3 m/s. Vaaka-akselisella tuulivoimalalla on parempi hyötysuhde verrattuna pystyakseliseen, mutta pystyakselinen voimala on vähemmän herkkä tuulen pyörteilylle. Tuulivoimalan sijoittamiseen on kiinnitettävä erityishuomiota, jotta tuuli osuu voimalaan ja pyörteilyltä sekä meluhaitalta välttyään. [1, s. 59–60, 63]

Vesivoimalla sähköä voidaan tuottaa myös pienissä yksiköissä jokien varsilla. Pien-vesivoimaloissa tyypillinen putouskorkeus on 2–6 metriä ja teho 100–1000 kilowattia. Laitosten käyttöikä on noin 60–100 vuotta. Vesivoima on kallista rakentaa, mutta edullista käyttää. Suomessa arvioitu hyödynnettävissä oleva (suojelematon) potentiaali on noin 1400 GWh vuodessa. [1, s. 64–66]

2.3 Laskennallinen energiankulutus ja E-luku

Tässä alaluvussa määritellään rakennuksen standardikäyttö, rakennuksen energiankulutuksen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen, ostoenergian laskenta rakentamismääräyskokoelman osan D5 (2012) mukaan ja U-arvojen laskenta. RakMK osassa D5 (2012) esitetty laskentamenetelmä perustuu standardiin SFS-EN 13790 [25, s. 11]. Luvun lopussa on lisäksi kerrottu lyhyesti energiamääräysten kehittymisestä. Taulukoita, jotka eivät liity suoraan tässä työssä tehtyihin laskelmiin ei ole esitetty tässä luvussa, vaan on tyydytty viittaamaan rakentamismääräyskokoelmaan.

Energialaskennassa otetaan huomioon ainoastaan RakMK osassa D3 (2012) luetellut tekniset järjestelmät. Huomioon ei oteta muun muassa ulkovalaistusta, hissejä tai ammattikeittiöitä. Rakennuksessa olevat ruokalat, kahvilat ja muut erikoistilat lasketaan kuuluvaksi muuhun rakennukseen ja niiden energialaskenta tehdään kuten muunkin rakennuksen. [9, s. 22]

Rakennuksen kokonaisenergian kulutusta kuvaa energialuku, eli E-luku. E-luku on ostoenergia painotettuna energiamuotokertoimilla ja jaettuna nettopinta-alalla. [23, s. 11] Nettopinta-ala voidaan laskea vähentämällä bruttoalasta ulkoseinien rakennusosala [9, s. 5]. Ostoenergian laskenta on käsitelty alaluvussa 2.3.3. RakMK osa D3 (2012) määrittää rakennuksen standardikäytön, jolla E-luku lasketaan [9, s. 6]. Määräysten piiriin eivät kuulu:

1. Nettoalaltaan alle 50 m² kokoiset rakennukset.
2. Tuotantolaitokset, joissa tuotantoprosessi tuottaa paljon lämpöenergiaa.
3. Muut kuin asuinkäyttöön tarkoitettut maatalousrakennukset, joissa energiankäyttö on vähäistä.
4. Kasvihuone, väestönsuoja tai muu rakennus, jonka käyttö tarkoitukseensa vaikeutuisi huomattavasti RakMK osan D3 (2012) määräyksiä noudatettaessa.
5. Loma-asunto, johon ei ole suunniteltu kokovuotiseen käyttöön tarkoitettua lämmitysjärjestelmää.
6. Määräaikainen siirtokelpoinen rakennus, joka on valmistettu ennen RakMK D3 (2012) voimaantuloa ja jonka käyttötarkoitus ei oleellisesti muutu. [9, s. 3]

Ostoenergialle käytettävät energiamuotokertoimet on esitetty taulukossa 2.4. E-luku ohjaa valitsemaan ympäristön kannalta parempia ratkaisuja, esimerkiksi lämmittämällä

kaukolämmöllä saadaan pienempi E-luku kuin suoralla sähkölämmityksellä [1, s. 26–27].

Taulukko 2.4 *Energiamuotojen kertoimet [9, s. 8].*

Energiamuoto	Kerroin
Sähkö	1,7
Kaukolämpö	0,7
Kaukojäähdytys	0,4
Fossiiliset polttoaineet	1,0
Rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5

Haettaessa rakennuslupaa on esitettävä energiaselvitys, joka pitää sisällään yleensä seuraavat tarkastelut:

1. Rakennuksen E-luku
2. Energialaskennan lähtötiedot ja tulokset
3. Kesäaikainen huonelämpötila ja mahdollinen jäähdytysteho
4. Rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuus
5. Rakennuksen lämmitysteho
6. Rakennuksen energiatodistus

Tämän lisäksi esitetään mahdolliset lisäselvitykset. Lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittamisessa käytetään vertailuarvoja vaipan lämpöhäviöille, lämmön talteenotolle, ilmanvuotoluvulle ja ikkunapinta-alalle. Vertailuarvot muodostavat rakennukselle vertailulämpöhäviön. Lämpöhäviöiden tasauslaskelmassa vertailulämpöhäviötä verrataan suunnitteluratkaisuun, jonka häviöitä voidaan kompensoida toisiltaan. [9, s. 12, 26]

Taulukossa 2.5 on esitetty E-luvun ylärajat eri rakennusluokille. Luokassa 9 E-luvulle ei ole asetettu ylärajaa, mutta se täytyy kuitenkin laskea. Mikäli rakennuksessa on useita käyttötarkoituksluokkia, jaetaan rakennus niiden mukaan osiin. Näiden osien on täytettävä taulukon 2.5 vaatimukset. Jos osan pinta-ala on alle 10 % lämmitetystä nettoalasta, voidaan se laskea kuuluvaksi muun rakennuksen käyttötarkoituksiin. [9, s. 9]

Taulukko 2.5 Uudisrakennusten E-lukujen ylärajat [9, s. 9].

Käyttötarkoitus	Luokka	Lämmitetty nettoala A_{netto}	kWh/m ² vuodessa
Pientalo	1	$A_{\text{netto}} < 120 \text{ m}^2$ $120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} < 150 \text{ m}^2$ $150 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} < 600 \text{ m}^2$ $A_{\text{netto}} < 600 \text{ m}^2$	204 $372 - 1,4 \cdot A_{\text{netto}}$ $173 - 0,07 \cdot A_{\text{netto}}$ 130
Hirsitalo	1	$A_{\text{netto}} < 120 \text{ m}^2$ $120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} < 150 \text{ m}^2$ $150 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} < 600 \text{ m}^2$ $A_{\text{netto}} < 600 \text{ m}^2$	229 $397 - 1,4 \cdot A_{\text{netto}}$ $198 - 0,07 \cdot A_{\text{netto}}$ 155
Rivi- ja ketjutalo	1		150
Asuinkerrostalo	2		130
Toimistorakennus	3		170
Liikerakennus	4		240
Majoitusliikerakennus	5		240
Opetusrakennus ja päiväkot	6		170
Liikuntahalli poislukien uima- ja jäähalli	7		170
Sairaala	8		450
Muut rakennukset ja määräaika-	9		Ei vaatimusta
rakennukset			

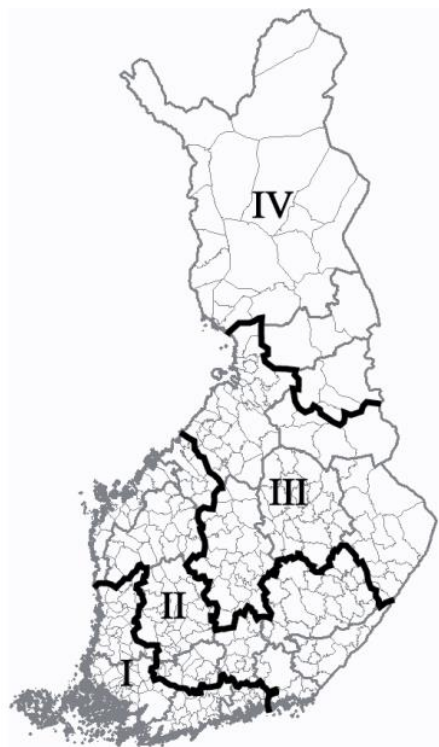
Taulukossa 2.6 on esitetty standardikäytön mukaisessa laskennassa käytettävät sisälämpötilat ja ulkoilmavirta. Lisäksi muissa paitsi luokan 1 ja 2 rakennuksissa on ilmavirran oltava käyttöajan ulkopuolella $0,15 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ nettoneliötä kohden. Ulkoilmavirta saattaa poiketa RakMK D2 (2012) vaatimista ilmamääristä. Rakennusluokassa 9 käytetään suunnitteluarvoja. [9, s. 28]

Taulukko 2.6 Ulkoilmavirta, sekä sisälämpötilan rajat standardikäytöllä. [9, s. 18]

Käyttötarkoitusluokka	Ulkoilmavirta $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	Lämmitysraja °C	Jäähdytysraja °C
Asuinkerrostalo	0,5	21	27
Toimistorakennus	2	21	25
Liikerakennus	2	18	25
Majoitusliikerakennus	2	21	25
Opetusrakennus tai päiväkot	3	21	25
Sairaala	4	22	25
Liikuntahalli	2	18	25

Taulukossa 6 esitetty jäähdytysraja ei saa ohjeellisesti ylittyä 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta välisenä aikana yli 150 astetuntia lämpökuormilla, suunnitelluilla ilmamäärillä ja RakMK D3 (2012) liitteessä 2 annetuilla säätiedoilla laskettuna. Kesäajan huonelämpötilan laskentaa ei tarvitse tehdä käyttötarkoitusluokissa 1 ja 9. Muissa käyttötarkoitusluokissa tulee tehdä kesäajan lämpötilalaskennat tilatyypeille, joissa on eniten lämpökuormia. [9, s. 9–10]

Säävyöhykkeet on esitetty kuvassa 2.8. RakMK osassa D3 (2012) liitteessä 2 on annettu säätiedot kuukausittain sekä mitoittavat ulkoilman lämpötilat, Auringon säteilyn vaikutukset ja vuoden keskimääräinen lämpötila. Liitteessä A on myös esitetty laskennassa käytetyt säätiedot.



Kuva 2.8 Säävyöhykkeet [9, s. 29].

Vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa kokonaisenergiankulutuksen, lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen ja kesäajan huonelämpötilan laskenta tehdään vyöhykkeen I–II säätiedoilla. [9, s. 29; 23 s.15]

Rakentamismääräyskokoelman ja sen mukaisen energiatehokkuuden osatekijöiden, kehittyminen voidaan nähdä taulukosta 2.7. Vuonna 2012 tuli voimaan E-luku ja samalla siirryttiin kokonaisenergiatarkasteluun [23, s. 8].

Taulukko 2.7 Vaatimusten kehittyminen *U*-arvojen, ilmanpitävyyden ja lämmöntalteenoton (*LTO*) suhteen [muokattu 23, s. 8].

RakMK	1976	1978	1985	2003	2007	2010	2012
Ulkoseinä (W/(m ² K))	0,40	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17
Yläpohja (W/(m ² K))	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09	0,09
Maanvarainen alapohja (W/(m ² K))	0,40	0,40	0,36	0,25	0,24	0,16	0,16
Ikkuna (W/(m ² K))	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0	1,0
Ilmanpitävyys ^{a)} (1/h, m ³ /(h·m ²))				n ₅₀ =4,0	n ₅₀ =4,0	n ₅₀ =4,0	q ₅₀ =4,0
LTO vuosihyötysuhde (%)				30	30	45	45

a) 50 Pa:n paine-erolla

E-luvun laskentaa on eri työkaluilla on vertailtu aiemmin lähteessä [26] ja [27]. Näistä lähteistä voidaan päätellä, että käytetty laskentatyökalu vaikuttaa saatuun E-lukuun. Mikko Virpi on tutkinut [26] opiskelijoille saatavissa olevien ilmaisten laskureiden toimivuutta. Virpi vertaa Laskentapalveluiden, Puuinfon, CADS Planner Hepaci 16:ta ja MX6 energianlaskelmien eroja itse tekemänsä excel-laskurin rinnalla, joka noudattaa RakMK D5 (2012) laskentaohjetta. Laskennassa on mukana kuusi erilaista lämmitysvaihtoehtoa. E-luvuksi Laskentapalvelut antoi suurempia arvoja, Puuinfon laskuri pienempiä arvoja, CADS Planner 16 Hepac antoi vastaavia arvoja ja MX6 energia pääsääntöisesti pienempiä arvoja kuin excel-laskuri. Virpin laskentatulokset ovat nähtävillä taulukossa 2.8.[26]

Taulukko 2.8 Vertailurakennuksen E-luvun arvot eri energialaskureilla ja lämmitysmuodoilla [26, s. 23].

Lämmitysmuoto	CADS	Laskenta- palvelut	Puuinfo	MX6	Itse lasketut
Kaukolämpö	200	209	182	195	199
Kaukolämpö ja aurinko	188	197	180	168	187
Maalämpöpumppu	183	188	172	179	182
Maalämpöpumppu ja aurinko	171	176	167	167	171
Pelletti	189	197	166	187	190
Sähkö	285	318	288	294	285

Olli Rantanen on verrannut [27] jäähdytetyn pientalon IDA-ICE ja Excel-tilukkolaskennalla saatuja E-lukuja. Laskenta perustuu Suomen rakentamismääräyskokoelman osiin D3(2012), D5(2012) ja D5(2007). Laskennassa varioitiin saman rakennuksen ominaisuuksia tuottaen 10 erilaista ratkaisua. Kaikissa paitsi yhdessä pientaloversiossa saatiin IDA-ICE -simuloinneilla suurempia E-luvun arvoja kuin Excel-tilukkolaskennalla. Rantanen mainitsee, että erot syntyvät pääasiassa lämmityksestä.

2.3.1 U-arvon laskenta

RakMK osa C4 (2003) käsittelee rakennusvaipan lämpöhäviöiden laskentaa. Rakennusosan lämmönläpäisyä kuvataan U-arvolla ($W/(m^2 \cdot K)$), eli lämmönläpäisykertoimella, joka on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen R_T ($(m^2 \cdot K)/W$) käänteisluku ympäristöstä ympäristöön

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2.25)$$

Kun laskettavassa ainekerroksessa j on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia kerroksia, lämmönvastus R_j ($(m^2 \cdot K)/W$) lasketaan

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_n}{R_{nj}}, \quad (2.26)$$

jossa f_a, f_b, f_n , ovat tasa-aineisen osa-alueen a, b, ..., n ainekerroksen pinta-alan suhteellinen osuus kokonaispinta-alasta, R_{aj}, R_{bj}, R_{nj} ovat osa-alueiden lämmönvastukset. Jos lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot vierekkäisille ainekerroksille eroavat enemmän kuin viisinkertaisesti, ei kaava (26) sovellu käyttöön. [7, s. 5]

Kun lämmönjohtavuudet eroavat toisistaan yli viisinkertaisesti, lasketaan lämmönläpäisykertoimen lisäys

$$\Delta U_{\Psi X} = \sum \Psi_k \left(\frac{l_k}{A} \right) + \sum \chi_j \left(\frac{n_j}{A} \right), \quad (2.27)$$

jossa Ψ_k ($W/(m \cdot K)$) on rakennusosassa keskenään samanlaisten viivamaisten kylmäsiltojen viivamainen lisäkonduktanssi, χ_j (W/K) on rakennusosassa keskenään samanlaisten pistemäisten kylmäsiltojen j aiheuttama lisäkonduktanssi, l_k (m) on samanlaisten viivamaisten kylmäsiltojen yhteispituus rakennusosassa, n_j (-) on samanlaisten pistemäisten kylmäsiltojen lukumäärä rakennusosassa ja A (m^2) on rakennusosan pinta-ala. [7, s. 6]

Maanvastaisten rakenteiden, kuten maanvaraisten laattojen ja kellarinseinien, U-arvon laskennassa saadaan hyödyntää maa-aineiden lämmönvastusta. Lämmönvastuksia maa-aineiksittain on esitetty RakMK osassa C4 (2003) taulukossa 6. Kyseisiä arvoja ei voida käyttää, jos lattiarakenteen alapinta on yli 300 mm viereistä maanpintaa ylempanä. Lisäksi maakerroksen salaojakerroksen alapuolella tulee olla vähintään metrin paksu. Sorasta tai sepelistä tehdylle salaojalle voidaan käyttää lämmönvastusta 0,2 ($m^2 \cdot K$)/W salaojituserroksen paksuuden ollessa vähintään 200 mm. [7, s. 18]

Rakenteiden ilmapälit parantavat rakenteen lämmöneristävyyttä. Kattorakenteen tuulettuvan ilmatilan lämmönvastus R_g ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$) on 0,2 tai 0,3 riippuen kattorakenteesta. Arvo ei sisällä pintavastusta. Tuulettumattoman ilmakerroksen, muun kuin katon, oletetaan olevan ulkopuoliselta rakenteeltaan lämpöä eristämätön. Lisäksi väliin ei saa johtaa aukkoja, joiden pinta-ala on yhteenlaskettuna yli $5 \text{ cm}^2/\text{m}$ pystysuorassa rakenteessa eikä yli $5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ vaakasuorassa rakenteessa. Tuulettumattoman ilmakerroksen on esitetty RakMK osan C4 (2003) taulukosta 3. Ilmakerroksen lämmönvastus riippuu ilmaraon paksuudesta, pinnan emissiiviteetistä ja lämpövirran suunnasta. [7, s. 16–17]

Ikkunan, oven tai tuuletusluukun U-arvoa laskettaessa ei tarvitse ottaa huomioon sarakkeita, painikkeita tai muita heloituksia. Ikkunoista, ovista ja tuuletusluukuista lasketaan U-arvo vain yleisimmälle rakennuksessa käytetylle koolle. [7, s. 20]

Ikkunan valoaukon lämmönläpäisykerroin U_g ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) lasketaan

$$U_g = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum R_{sj}}, \quad (2.28)$$

jossa R_{si} ja R_{se} ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$) ovat pintavastuksia, λ_j ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) on lasin tai läpinäkyvän ainekerroksen j lämmönjohtavuus, d_j (m) on lasin tai läpinäkyvän ainekerroksen j paksuus ja R_{sj} ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$) on lasinvälin j lämmönvastus. RakMK osassa C4 (2003) taulukossa 7 annetaan lasinvälin lämmönvastuksen arvoja ilmalla, argonilla tai kryptonilla täytetyille väleille. Puuikkunan kehän lämmönläpäisykerroin U_f ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) lasketaan

$$U_f = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{\beta d}{\lambda_n}}, \quad (2.29)$$

jossa d (m) on karmi- tai puiteosan keskimääräinen paksuus, λ_n ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) on karmi- tai puiteaineen normaalin lämmönjohtavuus, β on todellisuudessa moniulotteisen lämpövirran huomioon ottava korjauskerroin ($\beta=0,7$). Lasituksen ja kehärakenteen liittymiskohdan lämpöhäviö otetaan huomioon viivamaisella lisäkonduktanssilla Ψ_g ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). RakMK osassa C4 (2003), taulukossa 10 annetaan arvoja lisäkonduktanssille. Ikkunan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin U_w ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) lasketaan

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \Psi_g}{A_g + A_f}, \quad (2.30)$$

jossa A_g (m^2) on valoaukon pinta-ala, A_f (m^2) on karmi- tai puiteosan projektiopinta-ala ikkunan lasituksen tasossa ja l_g (m) on valoaukon reunaan muodostuvan viivamaisen kylmäsilän pituus. [7, s. 20, 21]

Oven ja tuuletusluukun keskimääräinen lämmönläpäisykerroin U_D ($W/(m^2 \cdot K)$) lasketaan

$$U_D = \frac{A_g U_g + A_p U_p + A_f U_f + l_g \Psi_g}{A_g + A_p + A_f}, \quad (2.31)$$

jossa A_p on ovilevyn umpiosan pinta-ala ja U_p ($W/(m^2 \cdot K)$) ovilevyn umpiosan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin. [7, s. 23]

Yksittäisille rakennusosille on annettu U -arvon yläraja-arvot. Seinän, puolilämpimään tilaan rajoittuvan rakennusosan, ylä- tai alapohjan lämmönläpäisykerroin saa olla enintään $0,60 W/(m^2 \cdot K)$. Lämpimän tilan ikkunan, oven, umpinaisen savunpoisto- tai uloskäyntiluukun lämmönläpäisykerroin saa olla enintään $1,8 W/(m^2 \cdot K)$ ja puolilämpimän tilan enintään $2,8 W/(m^2 \cdot K)$. [9, s. 11]

On olemassa myös luonnosversio RakMK C4 (2012), mutta suurin osa tämän työn kohteista on suunniteltu ennen tätä luonnosversiota. Eräitä mainittavia eroja verrattaessa RakMK C4 (2012) luonnoksen ja RakMK C4 (2003) on yläraja-alaraja -menetelmän käyttö sekä kellarinseinien ja maanvastaisten alapohjien lämmönläpäisykerroimen tarkempi laskenta.

2.3.2 Lämpöenergian kulutus

RakMK osa D5 (2012) käsittelee energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskentaa. ”Rakennuksen energiatehokkuutta koskevien määräysten vaatimuksenmukaisuuden osoittamisessa tulee käyttää RakMK osassa D3 (2012) annettuja lähtöarvoja, laskentasääntöjä, ja sen liitteessä 2 esitettyjä säätietoja sekä kohteen suunnitteluarvoja.” Muissa tarkasteluissa voidaan käyttää RakMK osan D5 (2012) antamia arvoja, mikäli muuta tietoa ei ole käytettävissä. [25, s. 3]

Tilojen lämmitystarve koostuu rakennusvaipan läpi johtumalla tapahtuvasta lämpöhäviöstä, vuotoilman lämpöhäviöstä sekä tulo- ja korvausilman lämpenemisestä. Tilojen lämmitysenergian tarve Q_{tila} (kWh) lasketaan

$$Q_{tila} = Q_{joht} + Q_{vuotoilma} + Q_{iv,tuloilma} + Q_{iv,korvausilma}, \quad (2.32)$$

jossa Q_{joht} (kWh) on johtumislämpöhäviöt vaipan läpi, $Q_{vuotoilma}$ (kWh) vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, $Q_{iv,tuloilma}$ (kWh) tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve ja $Q_{iv,korvausilma}$ (kWh) korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve. [25, s. 15]

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt vaipan läpi Q_{joht} (kWh) koostuvat rakennusosien lämpöhäviöiden lisäksi kylmäsiltojen lämpöhäviöistä:

$$Q_{\text{joht}} = Q_{\text{ulkoseinä}} + Q_{\text{yläpohja}} + Q_{\text{alapohja}} + Q_{\text{ikkuna}} + Q_{\text{ovi}} + Q_{\text{muu}} + Q_{\text{kylmäsilta}}, \quad (2.33)$$

jossa $Q_{\text{ulkoseinä}}$ (kWh) on johtumislämpöhäviöt ulkoseinien läpi, $Q_{\text{yläpohja}}$ (kWh) johtumislämpöhäviöt yläpohjien läpi, Q_{alapohja} (kWh) johtumislämpöhäviöt alapohjien läpi, Q_{ikkuna} (kWh) johtumislämpöhäviöt ikkunoiden läpi, Q_{ovi} (kWh) johtumislämpöhäviöt ulko-ovien läpi, Q_{muu} (kWh) johtumislämpöhäviöt tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta ja $Q_{\text{kylmäsilta}}$ (kWh) kylmäsiltojen johtumislämpöhäviö. [25, s. 15–16]

Ulkoilmaan rajoittuvien ulkoseinien, ikkunoiden, ovien sekä ylä- ja alapohjien lämpöhäviöt Q_{rakosa} (kWh) lasketaan rakennusosittain

$$Q_{\text{rakosa}} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000, \quad (2.34)$$

jossa U_i (W/m²K) on rakennusosan i lämmönläpäisykerroin, A_i (m²) on rakennusosan i pinta-ala, T_s (°C) sisälämpötila, T_u (°C) ulkoilman lämpötila ja Δt (h) on ajanjakson pituus. Laskettaessa johtumislämpöhäviöitä muuhun tilaan, ulkolämpötilan T_u tilalla käytetään muun tilan suunnittelulämpötilaa. [25, s. 16]

Maanvastaisten alapohjien kautta johtuva energia lasketaan siten että T_u kaavassa (2.34) korvataan maan lämpötilalla $T_{\text{maa, vuosi}}$ (°C) tai $T_{\text{maa, kuukausi}}$ (°C). $T_{\text{maa, vuosi}}$ on ulkoilman vuotuinen keskilämpötila $T_{u, \text{vuosi}} + 5$ °C. Määräystenmukaisuutta osoittaessa $T_{\text{maa, vuosi}}$ on 10,57 °C. $T_{\text{maa, kuukausi}}$ lasketaan kuukausittain

$$T_{\text{maa, kuukausi}} = T_{\text{maa, vuosi}} + \Delta T_{\text{maa, kuukausi}}, \quad (2.35)$$

jossa $\Delta T_{\text{maa, kuukausi}}$ (°C) on kuukausittaisen keskilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero. $\Delta T_{\text{maa, kuukausi}}$ arvoja on esitetty taulukossa 2.9. [25, s. 18; 9, s. 30] Tätä menetelmää ei tule käyttää, mikäli lämmönläpäisykertoimet on laskettu maan lämmönvastus huomioon ottaen. Ohjeessa RakMK C4 (2003) maan lämmönvastus otetaan huomioon erikseen, kuten on todettu alaluvussa 2.3.1.

Vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve $Q_{\text{vuotoilma}}$ (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{vuotoilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v,\text{vuotoilma}} (T_s - T_u) \Delta t / 1000, \quad (2.37)$$

jossa ρ_i ($=1,2 \text{ kg/m}^3$) on ilman tiheys, c_{pi} ($=1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$) ilman ominaislämpökapasiteetti, $q_{v,\text{vuotoilma}}$ (m^3/s) vuotoilmavirta, T_s ($^{\circ}\text{C}$) sisälämpötila, T_u ($^{\circ}\text{C}$) ulkoilman lämpötila ja Δt (h) on ajanjakson pituus. [25, s. 19]

Vuotoilmavirta $q_{v,\text{vuotoilma}}$ (m^3/s) lasketaan

$$q_{v,\text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{\text{vaippa}}, \quad (2.38)$$

jossa q_{50} ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) on rakennusvaipan ilmanvuotoluku, A_{vaippa} (m^2) vaipan pinta-ala sekä x kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille ja sitä korkeimmille rakennuksille 15 kerroskorkeuden ollessa noin 3 m. Vain maapinnan yläpuoliset kerrokset otetaan huomioon. Mikäli kerroskorkeus on paljon suurempi kuin 3 m, valitaan x siten että kerrosmäärä vastaa korkeutta. [25, s. 19] q_{50} voidaan laskea kaavalla (2.16). Jos ilma- vuotolukua ei tunneta, voidaan käyttää arvoa $4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Pienemmät ilmanvuotoluvut tulee mitata tai muilla menetelyillä osoittaa. [9, s. 10] Vanhempi termi, vuotoilma-kerroin $n_{\text{vuotoilma}}$ [$1/\text{h}$] voidaan muuttaa n_{50} [$1/\text{h}$] vuotoilmaluvuksi

$$n_{\text{vuotoilma}} = n_{50} / 25 [28, \text{s. 11}]. \quad (2.39)$$

Tuloilman tilassa tapahtuvan lämpenemisen lämpöenergian tarve $Q_{\text{iv,tuloilma}}$ (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{iv,tuloilma}} = t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,\text{tulo}} (T_s - T_{sp}) \Delta t / 1000, \quad (2.40)$$

jossa t_d ($\text{h}/24 \text{ h}$) on ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte, t_v ($\text{vrk}/7 \text{ vrk}$) ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen viikoittainen käyntiaikasuhte, ρ_i ($=1,2 \text{ kg/m}^3$) ilman tiheys, c_{pi} ($=1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$) ilman ominaislämpökapasiteetti, $q_{v,\text{tulo}}$ (m^3/s) tuloilmavirta, T_s ($^{\circ}\text{C}$) sisälämpötila, T_{sp} ($^{\circ}\text{C}$) sisäänpuhalluslämpötila ja Δt (h) on ajanjakson pituus. Tuloilman sisäänpuhalluslämpötilana voidaan käyttää 18°C , jos tarkempaa tietoa ei ole. [25, s. 22–23]

Standardikäytöllä ilmanvaihtokoneiden käyntiaika saadaan lisäämällä 1 tunti ennen rakennuksen käyttöajan alkua ja 1 tunti käyttöajan päättymisen jälkeen. Tämä ei koske jatkuvasti käytettäviä rakennuksia. [9, s. 20]

Korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve lasketaan

$$Q_{\text{iv,korvausilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v,\text{korvausilma}} (T_s - T_u) \Delta t / 1000, \quad (2.41)$$

jossa $Q_{iv,korvausilma}$ (kWh) korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve ja $q_{v,korvausilma}$ (m³/s) korvausilmavirta. Korvausilmavirta $q_{v,korvausilma}$ (m³/s) lasketaan

$$q_{v,korvausilma} = \sum t_d t_v q_{v,poisto} - \sum t_d t_v q_{v,tulo}, \quad (2.42)$$

jossa t_d (h/24 h) on ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte, t_v (vrk/7 vrk) ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen viikoittainen käyntiaikasuhte, $q_{v,tulo}$ (m³/s) tuloilmavirta ja $q_{v,poisto}$ (m³/s) poistoilmavirta. Jos tuloilmavirta on suurempi tai yhtä suuri kuin poistoilmavirta, korvausilmavirtaa ei ole. [25, s. 23]

Ilmanvaihdon lämmitysenergian tarpeen laskennassa otetaan huomioon tuloilman lämpötila ja lämmöntalteenotto. Kesä-, heinä- ja elokuussa lämmöntalteenotto ja jälkilämmitys ovat pois käytöstä, ellei rakennuksen käyttö edellytä muuta. Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve Q_{iv} (kWh) lasketaan

$$Q_{iv} = t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} ((T_{sp} - \Delta T_{puhallin}) - T_{lto}) \Delta t / 1000, \quad (2.43)$$

jossa T_{sp} (°C) sisäänpuhalluslämpötila, $\Delta T_{puhallin}$ (°C) lämpötilan nousu puhaltimessa ja T_{lto} (°C) lämpötila lämmönottolaitteen jälkeen. T_{lto} lasketaan

$$T_{lto} = T_u + \frac{\eta_{a,ivkone} q_{v,poisto} (T_s - T_u)}{q_{v,tulo}}, \quad (2.44)$$

jossa T_u (°C) on ulkolämpötila, $\eta_{a,ivkone}$ (-) ilmanvaihtokoneen poistoilman vuosihyötysuhde $q_{v,poisto}$ (m³/s) poistoilmavirta ja $q_{v,tulo}$ (m³/s) tuloilmavirta. [25, s. 20–21]

Lämpötilahyötysuhteena η_t (-) voidaan käyttää valmistajan ilmoittamaa varmennettua hyötysuhdetta tai arvoja taulukosta 2.12. Lämmöntalteenoton jäätymisenesto on otettava huomioon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteessa. Ohjeita vuosihyötysuhteen määrittämiseksi lämpötilahyötysuhteesta löytyy Ympäristöministeriön monisteesta 122. [25, s. 22]

Taulukko 2.12 *Lämpötilahyötysuhteiden arvoja RakMK D5 (2012) mukaan [muokattu 25, s. 22]*

Lämmönsiirtimen tyyppi	Lämpötilahyötysuhde η_t
Nestekiertoinen	0,40
Ristivirta	0,50
Vastavirta	0,60
Regeneratiivinen	0,65

Ympäristöministeriön monisteesta löytyvä yksinkertainen tapa laskea lämmön talteenoton vuosihyötysuhde η_a (-) on

$$\eta_a = 0,6 \eta_t, \quad (2.45)$$

jossa η_t (-) on tuloilman lämpötilahyötysuhde. Tämä yksinkertainen tapa antaa melko pieniä, varmalla puolella olevia vuosihyötysuhteen arvoja. Jos laitteen valmistaja ei ilmoita tuloilman lämpötilahyötysuhdetta, voidaan se laskea

$$\eta_t = \frac{T_{t,LTO} - T_u}{T_s - T_u}, \quad (2.46)$$

jossa $T_{t,LTO}$ on tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen, T_u ulkolämpötila mitoituslämpötilassa ja T_s sisälämpötila. [29, s. 7, 14, 16]

Laskentapalveluiden [30] LTO-laskuri laskee koko rakennuksen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen Ympäristöministeriön monisteen 122 mukaan käyttäen lämpötilanpysyvyystietoja. Laskuriin syötetään säävyöhyke sekä ilmanvaihdon ja lämmöntalteenoton tiedot.

Standardikäytön mukaiset sisäiset lämpökuormat, käyttöasteet ja käyttöajat on määritetty taulukossa 2.13 rakennustyypeittäin. Valaistuksen ja kuluttajalaitteiden oletetaan olevan päällä vain käyttäjien läsnä ollessa. Käyttöaste kuvaa ihmisten, laitteiden ja valaistuksen käyttöä suhteessa käyttöaikaan. [9, s. 19, 20]

Taulukko 2.13 Opetusrakennusten, päiväkotien ja liikuntahallien standardikäyttö ja sisäiset lämpökuormat [muokattu 9, s. 19].

Käyttötarkoitus-luokka	Kellonaika	Käyttö-aika		Käyttö-aste	Valaistus ^{a)}	Kuluttajalaitteet	Ihmiset
		h/24h d/7d		-	W/m ²	W/m ²	W/m ²
Opetusrakennus tai päiväkot	08:00-16:00	8	5	0,6	18	8	14
Liikuntahalli	08:00-22:00	14	7	0,5	12	0	5

a) Ohjearvo uudisrakennuksille. Pienempää valaistustehoa voidaan käyttää, mikäli valaistustaso säilyy ja siitä esitetään erillisselvitys.

Vuotuinen lämpökuorma laitteista, ihmisistä ja valaistuksesta lasketaan

$$Q = kP \frac{\tau_d}{24} \frac{\tau_w}{7} \frac{8760}{1000}, \quad (2.47)$$

jossa τ_d (h) on rakennuksen käyttötuntien määrä vuorokaudessa, τ_w (d) on käyttöpäivien määrä viikossa, P (W/m²) on lämpökuorma ja k (-) käyttöaste. [9, s. 19]

Ihmiset, sähkölaitteet, lämpimän veden valmistus ja kierto sekä Aurinko tuottavat rakennukseen lämpökuormaa. Valaistuksen ja muiden sähkölaitteiden lämpökuormat saadaan suoraan sähköenergian kulutuksesta. Ikkunoiden kautta rakennukseen tulevan auringonsäteilyenergian laskennassa otetaan huomioon ilman suunta, g-arvo, läpäisykerroin ja ikkunan pinta-ala. Läpäisykerroin kattaa kehän, verhojen ja varjostuk-

sien vaikutukset. Lämpimän käyttöveden kierron ja varastoinnin laskennallisista lämpöhäviöistä 50 % lasketaan rakennuksen lämpökuormaksi. [25, s. 30–31, 33]

Rakennuksen lämpökuorma $Q_{\text{lämpökuorma}}$ (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{lämpökuorma}} = Q_{\text{henk}} + Q_{\text{säh}} + Q_{\text{aur}} + Q_{\text{lkv,kierto,kuorma}} + Q_{\text{lkv,varastointi,kuorma}}, \quad (2.48)$$

jossa Q_{henk} (kWh) on henkilöiden luovuttama lämpöenergia, $Q_{\text{säh}}$ (kWh) valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma, Q_{aur} (kWh) ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia, $Q_{\text{lkv,kierto,kuorma}}$ (kWh), lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöistä lämpökuormaksi tuleva osuus sekä $Q_{\text{lkv,varastointi,kuorma}}$ (kWh) lämpimän käyttöveden varastoinnista lämpökuormaksi tuleva osuus. Lämpimän käyttöveden kierron ja varastoinnin lämpöenergian tarpeesta lasketaan puolet lämpökuormaksi. Mikäli tarkempaa tietoa ei ole, $Q_{\text{lkv,varastointi}}$ saadaan RakMK taulukosta 6.3b. [25, s. 34, 42]

Lämpimän käyttöveden kierron lämpöenergian tarve $Q_{\text{lkv,kierto}}$ (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{lkv,kierto}} = \left(\phi_{\text{lkv,kiertohäviö,omin}} L_{\text{lkv}} + \phi_{\text{lkv,lämmitys,omin}} n_{\text{lämmityslaitte}} \right) \frac{8760}{1000}, \quad (2.49)$$

jossa $\phi_{\text{lkv,kiertohäviö,omin}}$ (W/m) on kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho, L_{lkv} (m) kiertojohdon pituus, $\phi_{\text{lkv,lämmitys,omin}}$ (W/kpl) kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho ja $n_{\text{lämmityslaitte}}$ (kpl) kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä. RakMK osassa D5 (2012) taulukossa 6.4 on annettu arvoja kiertojohdon häviölle ja lämmityslaitteiden ominaisteholle sekä taulukossa 6.5 on annettu ominaispituuksia kiertojohdolle nettoneliötä kohti. Taulukossa 2.14 on esitetty arvoja kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteholle. [25, s. 42]

Taulukko 2.14 Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho. Merkintä 0,5 D tarkoittaa eristyspaksuutta, joka on puolet putken ulkohalkaisijasta. [25, s. 43]

Eristystaso	Kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho
	$\phi_{\text{lkv,kiertohäviö,omin}}$
Ei tietoa	40 W/m
0,5 D	10 W/m
1,5 D	6 W/m

Ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia, Q_{aur} (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{aur}} = \sum G_{\text{säteily,vaakapinta}} F_{\text{suunta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g = \sum G_{\text{säteily,pystypinta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g, \quad (2.50)$$

jossa $G_{\text{säteily,vaakapinta}}$ (kWh/m²) on vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti, F_{suunta} (-) on muuntokerroin jonka avulla vaakatasolle tuleva säteily muutetaan pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi, $F_{\text{läpäisy}}$ (-) on sä-

teilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin, A_{ikk} (m^2) on ikkuna-aukon pinta-ala kehys- ja karmirakenteineen g (-) on ikkunan g -arvo sekä $G_{säteily,pystypinta}$ (kWh/m^2) auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille. Kuukausittaisia arvoja $G_{säteily,vaakapinta}$, $G_{säteily,pystypinta}$, ja F_{suunta} on esitetty liitteestä A tai RakMK D3 (2012) liitteessä 2. Jos tarkempaa tietoa ei ole käytettävissä, voidaan ikkunan g -arvo katsoa taulukosta 2.15.

Taulukko 2.15 Ikkunoiden g -arvoja eri lasituksille [25, s. 31]

Lasitus	g -arvo
Yksinkertainen lasitus	0,77
Kaksinkertainen lasitus	0,68
Yksipuitteinen, kolmilasinen ikkuna	0,63
Eristyslasi + erillislasi	0,59
Eristyslasi, matalaemissiiviteettipinnoite + erillislasi	0,50

$F_{läpäisy}$ lasketaan

$$F_{läpäisy} = F_{kehä} F_{verho} F_{varjostus}, \quad (2.51)$$

jossa $F_{kehä}$ (-) on kehäkerroin F_{verho} (-) verhokerroin ja $F_{varjostus}$ (-) varjostusten korjauskerroin. $F_{kehä}$ on ikkunan valoaukon pinta-alan suhde ikkunan kehään ja sen arvona voidaan käyttää 0,75, jos tarkempaa tietoa ei ole. Arvoja termille F_{verho} on esitetty taulukossa 2.16. [25, s. 30–31]

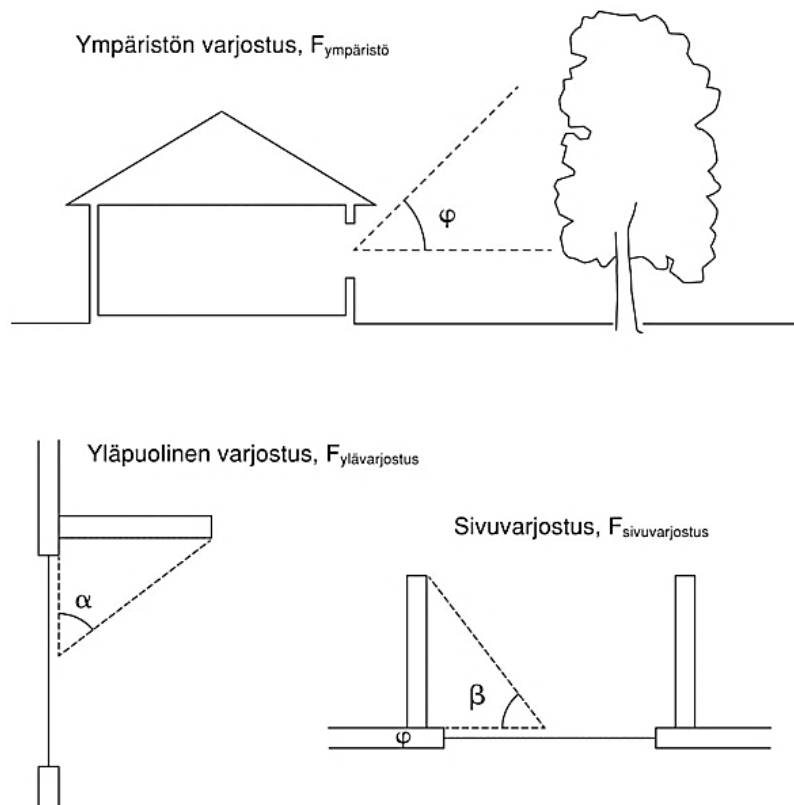
Taulukko 2.16 Verhokertoimia F_{verho} eri auringonsuojille [25, s. 32].

Auringonsuoja	Verhokerroin
Ei verhoa	1,00
Verhot	0,75
Valkoiset sälekaihtimet lasien välissä	0,30
Valkoiset sälekaihtimet sisäpuolella	0,60
Ikkunaluukut (säleikkö) ulkopuolella	0,30

Ikkunan varjostusten korjauskerroin $F_{varjostus}$ (-) lasketaan

$$F_{varjostus} = F_{ympäristö} F_{ylävarjostus} F_{sivuvarjostus}, \quad (2.52)$$

jossa $F_{ympäristö}$ (-) on ympäristön horisontaalisten varjostusten korjauskerroin, $F_{ylävarjostus}$ (-) on Ikkunan yläpuolisten vaakasuorien rakenteiden varjostusten korjauskerroin ja $F_{sivuvarjostus}$ (-) on ikkunan sivuilla olevien pystysuorien rakenteiden varjostusten korjauskerroin. Varjostuksia on havainnollistettu kuvassa 2.9. $F_{ympäristö}$ arvoja on esitetty taulukossa 2.17, $F_{sivuvarjostus}$ arvoja taulukossa 2.18 ja $F_{ylävarjostus}$ taulukossa 2.19. [25, s. 30–32]



Kuva 2.9 Varjostuskulmien määritelmät [25, s. 33].

Taulukko 2.17 15° ja 45° $F_{\text{ympäristö}}$ arvot eri kuukausille [muokattu 25, s. 32].

	Po		Ko/Lu		It & Lä		Ka/Lo		Et	
	15°	45°	15°	45°	15°	45°	15°	45°	15°	45°
Tammikuu	0.98	0.95	0.92	0.78	0.86	0.60	0.81	0.43	0.75	0.25
Helmikuu	0.96	0.90	0.90	0.70	0.83	0.50	0.80	0.40	0.76	0.30
Maaliskuu	0.96	0.90	0.90	0.70	0.83	0.50	0.82	0.45	0.80	0.40
Huhtikuu	0.93	0.80	0.88	0.65	0.83	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50
Toukokuu	0.93	0.80	0.89	0.68	0.85	0.55	0.88	0.63	0.90	0.70
Kesäkuu	0.86	0.60	0.85	0.55	0.83	0.50	0.87	0.63	0.91	0.75
Heinäkuu	0.90	0.70	0.88	0.63	0.85	0.55	0.88	0.65	0.91	0.75
Elokuu	0.88	0.65	0.84	0.53	0.80	0.40	0.80	0.40	0.80	0.40
Syyskuu	0.95	0.85	0.89	0.68	0.83	0.50	0.82	0.48	0.81	0.45
Lokakuu	0.96	0.90	0.91	0.73	0.85	0.55	0.81	0.43	0.76	0.30
Marraskuu	0.96	0.90	0.91	0.75	0.86	0.60	0.80	0.40	0.73	0.20
Joulukuu	0.98	0.95	0.96	0.88	0.93	0.80	0.83	0.50	0.73	0.20

Taulukko 2.18 Sivubarjostuksen $F_{\text{sivubarjostus}}$ korjauskertoimet lämmityskaudelle [muokattu 25, s. 33].

Kulma	Sivubarjostus				
	Po	Ko&Lu	It&Lä	Ka&Lo	Et
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10°	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98
20°	0.99	0.97	0.94	0.95	0.96
30°	0.99	0.95	0.9	0.92	0.94
40°	0.98	0.93	0.87	0.89	0.91
45°	0.98	0.90	0.82	0.84	0.85
50°	0.98	0.89	0.79	0.80	0.81
60°	0.98	0.86	0.73	0.73	0.73

Taulukko 2.19 Yläpuolisten varjostusten $F_{\text{ylävarjostus}}$ korjauskertoimet lämmityskaudelle [muokattu 25, s. 33].

Kulma	Yläpuolinen varjostus				
	Po	Ko&Lu	It&Lä	Ka&Lo	Et
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10°	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99
20°	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
30°	0.9	0.91	0.92	0.94	0.95
40°	0.87	0.88	0.88	0.90	0.92
45°	0.8	0.81	0.81	0.83	0.85
50°	0.75	0.76	0.76	0.77	0.79
60°	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66

Kaikkaa lämpökuormaa ei saada suoraan hyödynnettyä lämmityksessä, vaan lämpökuormille lasketaan kuukausittainen hyödyntämisaste, joka on riippuvainen lämpökuorman ja -häviön suhteesta sekä rakennuksen aikavakiosta. Hyödynnettävä osuus lämpökuormista $Q_{\text{sis.lämpö}}$ (kWh) lasketaan

$$Q_{\text{sis.lämpö}} = \eta_{\text{lämpö}} Q_{\text{lämpökuorma}}, \quad (2.53)$$

jossa $\eta_{\text{lämpö}}$ (-) on kuukausittainen hyödyntämisaste ja $Q_{\text{lämpökuorma}}$ (kWh) rakennuksen lämpökuorma. Kuukausittainen hyödyntämisaste $\eta_{\text{lämpö}}$ lasketaan

$$\eta_{\text{lämpö}} = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (2.54)$$

tai

$$\eta_{\text{lämpö}} = \frac{a}{a+1}, \text{ kun } \gamma=1, \quad (2.55)$$

joissa a (-) on numeerinen parametri ja γ (-) suhdeluku. Lämpökuorman ja tilan lämmitysenergian tarpeen suhdeluku γ lasketaan

$$\gamma = \frac{Q_{\text{lämpökuorma}}}{Q_{\text{tila}}}, \quad (2.56)$$

jossa $Q_{\text{lämpökuorma}}$ (kWh) on rakennuksen lämpökuorma ja Q_{tila} (kWh) tilojen lämmitysenergian tarve, joka lasketaan kaavalla (2.32). Numeerinen parametri a (-) lasketaan

$$a = 1 + \frac{\tau}{15}, \quad (2.57)$$

jossa τ (-) on aikavakio. Aikavakio lasketaan

$$\tau = \frac{C_{\text{rak}}}{H_{\text{tila}}}, \quad (2.58)$$

jossa C_{rak} (W·h/K) on rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti ja H_{tila} (W/K) rakennuksen tilojen ominaislämpöhäviö. Taulukossa 2.20 on arvoja toimistorakennuksen ominaiselle sisäpuoliselle teholliselle lämpökapasiteetille $C_{\text{rak,omin}}$ (W·h/(K·m²)), joita voidaan soveltaa päiväkotij- ja koulurakennuksille, joille RakMK D5 (2012) ei anna omia arvoja. [25, s. 34–35]

Taulukko 2.20 Toimistorakennuksen ominainen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti [muokattu 25, s. 36].

	$C_{\text{rak,omin}}$ (W·h/(K·m ²))
Kevyt rakenteinen	US, VS ja VP kevyitä rankarakenteita, AP betonia 70
Keskiraskas	US kevyitä rankarakenteita, VS kevyitä rankarakenteita tai betonia, VP ja AP betonia 110
Raskasrakenteinen	US, VP ja AP betonia, VS harkkoa tai betonia 160

Ominaisarvo kerrotaan nettopinta-alalla, jolloin saadaan rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti. Vaihtoehtoisesti C_{rak} voidaan laskea käyttäen standardia SFS-EN ISO 13786 tai SFS-EN ISO 13790 [25, s. 36].

Aiemman tutkimuksen [31] mukaan lämpökuormien hyödyntämisaste olisi pienempi kuin mitä standardi SFS-EN 13790 esittää. Belgian Ucclessa sijaitsevalle passiivitasoiselle koululle tehdyillä simuloinneilla on näytetty, että aikavakion τ ollessa 150, mikä kuvaa raskasrakenteista rakennusta, voidaan γ :n arvoilla 0,3–0,7 maksimissaan saavuttaa noin 0,9 kuukausittainen hyödyntämisaste, kun taas standardin mukaan hyödyntämisaste on 1,0. Tutkimuksen mukaan tämä johtuu rakennusten vaihtelevasta käytöstä.

Tilojen ominaislämpöhäviö H_{tila} (W/K) lasketaan

$$H_{tila} = \frac{Q_{tila}}{(T_s - T_u)\Delta t} 1000, \quad (2.59)$$

jossa Q_{tila} (kWh) on rakennuksen tilojen lämmitysenergian tarve, joka lasketaan kaavalla (32), T_s (°C) sisälämpötila, T_u (°C) ulkolämpötila ja Δt (h) ajanjakson pituus. [25, s. 35]

2.3.3 Sähköenergian kulutus

Ulkoilma- ja maalämpöpumput tuottavat lämmitysenergiaa, mutta kuluttavat myös sähköä. Vuotuista lämmitysenergian suhdetta käytettyyn sähköenergiaan kuvataan Seasonal Performance Factor -luvulla (SPF-luku). SPF-luku voidaan laskea käyttäen ympäristöministeriön oppaan laskentamenetelmää tai käyttämällä standardin SFS EN 16147 tai SFS EN 14511-3 mukaista testausmenetelmää. [25, s. 50]

Valaistuksen ja laitteiden sähköenergian kulutus neliötä kohti vuodessa W (kWh/m²) lasketaan kaavalla (47). Valaistuksen ja sähkölaitteiden sähkönkulutus katsotaan samaksi niiden aiheuttaman lämpökuorman kanssa. [9, s. 25]

Ilmanvaihdon sähköenergian kulutus $W_{ilmanvaihto}$ (kWh) lasketaan

$$W_{ilmanvaihto} = \sum SFP q_v \Delta t + W_{iv, muu}, \quad (2.61)$$

jossa SFP (kW/(m³/s)) on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, q_v (m³/s) ilmavirta, Δt (h) on laitteen käyttöaika laskentajaksolla ja $W_{iv, muu}$ (kWh) on muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus. Tarpeenmukaisesti ohjattu ilmanvaihto lasketaan erikseen soveltuvilla menetelmillä. SFP luku (kW/(m³/s)) lasketaan puhallin- tai konekohtaisesti

$$SFP = \frac{P_{puh}}{q_v}, \quad (2.62)$$

jossa P_{puh} (kW) on puhaltimen sähköteho ja q_v (m³/s) puhaltimen ilmavirta tai ilmanvaihtokoneen ilmavirroista suurin. Muu ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutus lasketaan

$$W_{iv, muu} = \sum P_{muu} \Delta t / 1000, \quad (2.63)$$

jossa P_{muu} (W) on muun ilmanvaihtojärjestelmän teho ja Δt (h) on laitteen käyttöaika laskentajaksolla. [25, s. 52, 54]

Mikäli jäähdytysjärjestelmä ei ole vain yksittäisissä tiloissa, jäähdytysjärjestelmän energiankulutus lasketaan energiasimulointiohjelmalla maksimissaan tunnin aika-askelin. [25, s. 11]

Lämmön jakelujärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus vuodessa W_{tilat} (kWh) lasketaan

$$W_{\text{tilat}} = e_{\text{tilat}} A_{\text{netto},i}, \quad (2.64)$$

jossa e_{tilat} (kWh/(m²·a)) on lämmön jakelujärjestelmän apulaitteiden sähköenergian ominaiskulutus ja $A_{\text{netto},i}$ on rakennuksen osan i lämmitetty netto-ala, jonka kyseinen lämmön jakelujärjestelmä kattaa. Lämmitysjärjestelmien apulaitteiden sähkönkulutuksen ohjearvoja on esitetty RakMK D5 (2012) taulukossa 6.2. [25, s. 38–40]

Lämpimän käyttöveden kiertopumpun sähköenergian kulutus $W_{\text{lkv,pumppu}}$ (kWh) voidaan laskea

$$W_{\text{lkv,pumppu}} = P_{\text{lkv,pumppu}} \frac{8760}{1000}, \quad (2.65)$$

jossa $P_{\text{lkv,pumppu}}$ (W) on lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun sähkömoottorin ottoteho. Jos ottotehoa ei tunneta, voidaan se laskea kertomalla mitoitusvirtaama arvolla 200 W/dm³/s. [25, s. 43]

Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää E-luvun laskennassa kulutusta vähentävänä tekijänä. Aurinkosähköjärjestelmän tuottamaan tehoon vaikuttavat aurinkokennon teho, kennoon kohdistuva säteilyn määrä ja käyttötilanteen toimivuus. Kennoihin lankeavat varjostukset otetaan huomioon erikseen. Aurinkosähkökennojen tuottama sähköenergia W_{pv} (kWh/a) lasketaan

$$W_{\text{pv}} = \frac{G_{\text{aur}} P_{\text{maks}} F_{\text{käyttö}}}{I_{\text{ref}}}, \quad (2.66)$$

jossa G_{aur} (kWh/(m²·a)) on kennostoon kohdistuva auringonsäteilyenergia vuodessa, P_{maks} (kW) aurinkosähkökennojen tuottama suurin sähköteho, jonka kennosto tuottaa referenssisäteilytilanteessa, $F_{\text{käyttö}}$ käyttötilanteen toimivuuskerroin ja I_{ref} (1 kW/m²) on referenssisäteilytilanne. $F_{\text{käyttö}}$ arvoja on esitetty taulukossa 2.21. [25, s. 66]

Taulukko 2.21 Käyttötilanteen toimivuuskerroin $F_{käyttö}$ aurinkosähkökennoille [25, s. 68].

Aurinkokennon asennustapa	$F_{käyttö}$ (-)
Tuulettamaton moduuli	0,70
Hieman tuuletettu moduuli	0,75
Voimakkaasti tuulettuva tai koneellisesti tuuletettu moduuli	0,80

Kennostoon vuodessa kohdistuvan auringonsäteilyn tuoma energia G_{aur} (kWh/(m²a)) lasketaan

$$G_{aur} = G_{aur,hor} F_{asento}, \quad (2.67)$$

jossa $G_{aur,hor}$ (kWh/m²) on vaakatasolle osuvan auringon säteilyn kokonaisenergiämäärä vuodessa ja F_{asento} (-) aurinkosähkökennon ilmansuunnan ja kallistuskulman mukainen korjauskerroin. $G_{aur,hor}$ on määräystenmukaisuutta osoitettaessa 975 kWh/m². Korjauskerroin F_{asento} lasketaan

$$F_{asento} = F_1 F_2, \quad (2.68)$$

jossa F_1 (-) on kerroin, joka saadaan ilmansuunnasta ja F_2 (-) kallistuksesta saatava kerroin. F_1 arvoja on esitetty taulukossa 2.22 ja F_2 arvoja taulukossa 2.23. [25, s. 66–67]

Taulukko 2.22 Ilmansuunnan kertoimet aurinkosähkökennoille [25, s. 67].

Suuntaus	F_1 (-)
etelä/kaakko/lounas	1,0
itä/länsi	0,8
pohjoinen/koillinen/luode	0,6

Taulukko 2.23 Kallistuksen kertoimet aurinkosähkökennoille [25, s. 67].

Kallistuskulma	F_2 (-)
< 30°	1,0
30°–70°	1,2
> 70°	1,0

Aurinkosähköjärjestelmän tuottama suurin sähköteho P_{maks} (kW) on testattu teho standardiolosuhteissa. Menetelmä on kuvattu standardissa SFS-EN 61829. Mikäli testattua tulosta ei ole, P_{maks} voidaan laskea

$$P_{maks} = K_{maks} A_{kenno}, \quad (2.69)$$

jossa K_{maks} (kW/m²) on huipputehokerroin, joka riippuu aurinkokennon tyypistä ja A_{kenno} (m²) on aurinkosähkökennon pinta-ala ilman kehystä. Huipputehokertoimen arvoja on esitetty taulukossa 2.24.

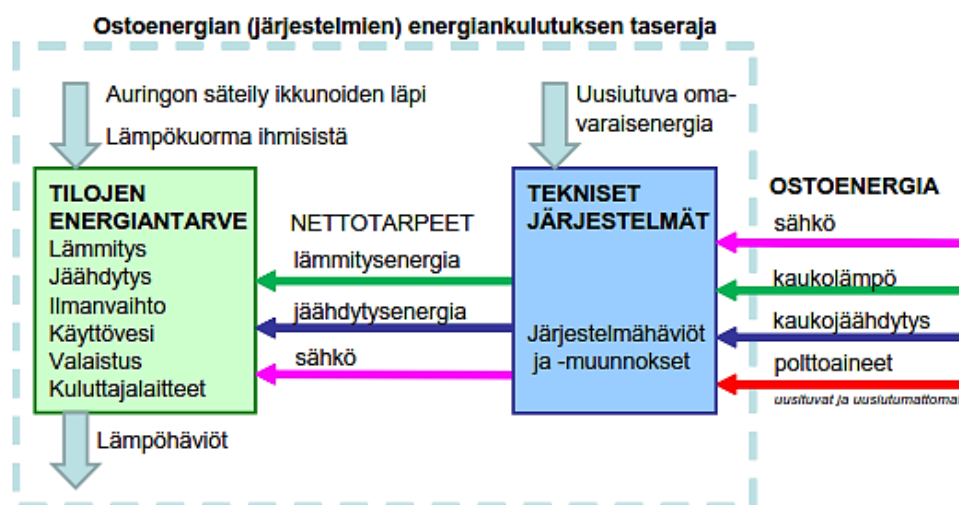
Taulukko 2.24 Huipputehokerroin K_{maks} aurinkosähkökennotyypeittäin [25, s. 67].

Aurinkosähkökennon tyyppi	K_{maks} (kW/m ²)
Piipohjaiset yksikiteiset (pakkaustiheys > 80 %)	0,12–0,18
Piipohjaiset monikiteiset (pakkaustiheys > 80 %)	0,10–0,16
Ohutkalvoinen kiteetön pii	0,04–0,08
Muut ohutkalvotekniikalla toteutetut	0,035
Ohutkalvotekniikalla toteutetut CuInGaSe ₂	0,105
Ohutkalvotekniikalla toteutettu CdTe	0,095

Tuotetusta sähköstä käytettävä osuus tulee soveltuvien menetelmin laskea siten, että varjostukset, sähkönkäytön ajalliset vaihtelut ja varastoinnin häviöt otetaan huomioon. [25, s. 66–67]

2.3.4 Ostoenergia ja tasauslaskelma

Ostoenergialla tarkoitetaan rakennuksen ulkopuolelta tuotua energiaa: polttoainetta, sähköä, kaukolämpöä tai -jäähdytystä [22, s. 12]. Ostoenergian taserajaa on havainnollistettu kuvassa 2.10. Ostoenergian määrä kertoo rakennuksen omavaraisuudesta. Luvun 2.3 alussa esitettyjä energiamuotokertoimia käytetään ainoastaan ostoenergialle E-lukua laskettaessa [9, s. 8].



Kuva 2.10 Ostoenergian taseraja [9, s. 6].

Lämmitysenergian tarve koostuu tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmitystarpeesta. Tästä tarpeesta vähennetään hyödynnettävät lämpökuormat. [25, s. 15] Lämpökuormien laskenta on esitetty alaluvussa 2.3.2. Lämpimän käyttöveden ominaiskulutus ja sen lämmittämiseen tarvittava energia on esitetty taulukossa 2.25. Kylmän veden oletettu lämpötila on +5 °C ja lämmitetyn käyttöveden +55 °C [9, s. 21].

Taulukko 2.25 Lämpimän käyttöveden kulutus ja sitä vastaava lämmitysenergian tarve standardikäytöllä [muokattu 9, s. 21].

Käyttötarkoitukseluokka	Lämpimän käyttöveden ominaiskulutus $\text{dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Lämmitysenergia $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
Opetusrakennus tai päiväkot	188	11
Liikuntahalli	515	30

Lämpimän käyttöveden, ilmanvaihdon ja tilojen lämmittämisen lisäksi lämpöä tarvitaan häviöiden korvaamiseen. Tiloille tämä tehdään jakamalla lämmitysjärjestelmittäin lämmitysenergia $Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$ (kWh) kyseisen järjestelmän hyötysuhteella $\eta_{\text{lämmitys,tilat}}$ (-) ja lisäämällä häviöt $Q_{\text{jakelu,ulos}}$ (kWh) ja $Q_{\text{varastointi,ulos}}$ (kWh) lämmittämättömiin tiloihin:

$$Q_{\text{lämmitys,tilat}} = \frac{Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}}{\eta_{\text{lämmitys,tilat}}} + Q_{\text{jakelu,ulos}} + Q_{\text{varastointi,ulos}}, \quad (2.70)$$

jossa $Q_{\text{jakelu,ulos}}$ (kWh) on jakelun häviöt lämmittämättömiin tiloihin ja $Q_{\text{varastointi,ulos}}$ (kWh) varastoinnin häviöt lämmittämättömiin tiloihin. Hyötysuhteen $\eta_{\text{lämmitys,tilat}}$ arvo- ja on esitetty taulukossa 2.26 tai RakMK D5 (2012) taulukosta 6.2. [25, s. 38]

Taulukko 2.26 Eräiden lämmitysjärjestelmien vuosihyötysuhteita [muokattu 25, s. 40].

Lämmitysratkaisu	Vuosihyötysuhde $\eta_{\text{lämmitys,tilat}}$
Vesiradiaattori 45/35 °C, jakojohdot eristetty	0,90
Vesiradiaattori 70/40 °C, jakojohdot eristetty	0,90
Vesikiertoinen lattialämmitys 40/30 °C	
Maata tai ryömintätilaa vasten	0,80
Lämmintä tilaa vasten	0,85
Sähköinen lattialämmitys	
Maata tai lämmintä tilaa vasten	0,85
Ryömintätilaa vasten	0,80

Mikäli samassa tilassa on useita lämmitystapoja, tulee lämmitysenergian nettotarpeet arvioida. Jos tarkempia laskelmia ei osoiteta, jaetaan nettotarve tasan kullekin järjestelmälle. [9, s. 24] Jakelun häviöt ulos lasketaan

$$Q_{\text{jakelu,ulos}} = q_{\text{jakeluhäviöt,ulos}} L, \quad (2.71)$$

jossa $q_{\text{jakeluhäviöt,ulos}}$ (kWh/(m·a)) on lämmön jakelujärjestelmän ominaislämpöhäviö lämmittämättömään tilaan ja L (m) lämmön jakelujärjestelmän meno- ja paluuputkien yhteenlaskettu pituus lämmittämättömässä tilassa. Jakoputkien lämpöhäviön $q_{\text{jakeluhäviöt,ulos}}$ ohjearvoja on esitetty RakMK D5 (2012) taulukossa 6.1. [25, s. 38–39]

Lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve määräytyy lämpimän käyttöveden kier-
ron ja varastoinnin lämpöhäviöstä, siirron hyötysuhteesta sekä lämpimän käyttöveden

lämpöenergian nettotarpeesta. Siirron hyötysuhteeseen vaikuttavat jakojohdon häviöt. Tarvittava lämmitysenergia lämpimälle käyttövedelle lasketaan

$$Q_{\text{Lämmitys,lkv}} = \frac{Q_{\text{lkv,netto}}}{\eta_{\text{lkv,siirto}}} + Q_{\text{lkv,varastointi}} + Q_{\text{lkv,kierto}}, \quad (2.72)$$

jossa $Q_{\text{lkv,netto}}$ (kWh) on lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve, $\eta_{\text{lkv,siirto}}$ (-) lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde, $Q_{\text{lkv,varastointi}}$ (kWh) varaajan häviöt ja $Q_{\text{lkv,kierto}}$ (kWh) lämpimän käyttöveden kiertojohdon häviöt. Kaavassa esiintyvä $Q_{\text{lkv,kierto}}$ (kWh) esiintyy myös lämpökuormien yhteydessä ja se lasketaan kaavalla (49). Siirron hyötysuhde vaihtelee rakennustyypeittäin ja on riippuvainen putkiston eristystasosta. Arvoja lämpimän käyttöveden siirron vuosihyötysuhteelle on esitetty taulukossa 2.27. [25, s. 41]

Taulukko 2.27 *Lämpimän käyttöveden siirron vuosihyötysuhde [muokattu 25, s. 41].*

		$\eta_{\text{lkv, siirto}}$			
		Kierto	Ei kiertoa		
Rakennustyyppi			eristämätön	suojaputkessa	eristetty, perustaso ^{a)} eristetty, parempi ^{b)}
Opetusrakennus tai päiväkot	0,89	0,7	0,79	0,83	0,86
Liikuntahalli	0,98	0,77	0,87	0,91	0,95

a) Vastaa eristyspaksuutta 0,5D, missä D on putken halkaisija.

b) Vastaa eristyspaksuutta 1,5D, missä D on putken halkaisija.

Tasauslaskelma on työkalu rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittamiseksi. Lämpöhäviöitä voidaan kompensoida toisillaan. Vertailuarvon muodostavat RakMK osassa D3 (2012) annetut arvot. Tasauslaskenta tehdään erikseen lämpimille ja puolilämpimille tiloille. Rakennuksen vaipan lämpöhäviöt H_{joht} (W/K) lasketaan

$$\sum H_{\text{joht}} = \sum (U_{\text{ulkoseinä}} A_{\text{ulkoseinä}}) + \sum (U_{\text{yläpohja}} A_{\text{yläpohja}}) + \sum (U_{\text{alapohja}} A_{\text{alapohja}}) + \sum (U_{\text{ikkuna}} A_{\text{ikkuna}}) + \sum (U_{\text{ovi}} A_{\text{ovi}}), \quad (2.73)$$

jossa U (W/(m²K)) on rakennusosan lämmönläpäisykerroin ja A (m²) rakennusosan pinta-ala. Tasauslaskennassa ei oteta huomioon rakenteiden välisiä kylmäsiltoja. Vertailuarvo muodostuu käytännössä vertailu-U-arvojen perusteella. Lisäksi ikkunapinta-alalle on annettu vertailuarvo. Vuotoilman lämpöhäviö $H_{\text{vuotoilma}}$ (W/K) lasketaan

$$H_{\text{vuotoilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v,\text{vuotoilma}}, \quad (2.74)$$

jossa ρ_i ($=1,2 \text{ kg/m}^3$) on ilman tiheys, c_{pi} ($=1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$) ilman ominaislämpökapasiteetti, $q_{v,vuotoilma}$ (m^3/s) vuotoilmavirta. Rakennuksen ilmanvaihdon lämpöhäviö H_{iv} (W/K) lasketaan

$$H_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{v,poisto} t_d t_v (1 - \eta_a), \quad (2.75)$$

jossa $q_{v,poisto}$ (m^3/s) on poistoilmavirta, t_d ($\text{h}/24 \text{ h}$) ilmanvaihtojärjestelmän keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde, t_v ($\text{vrk}/7 \text{ vrk}$) ilmanvaihtojärjestelmän keskimääräinen viikoittainen käyntiaikasuhde ja η_a (-) ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde. [9, s. 12–14]

3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Tutkimuksessa tarkasteltiin päiväkotien ja koulujen toteutunutta ja laskennallista energiankulutusta. Aineiston kerääminen toteutettiin yhteistyössä Tampereen, Helsingin ja Oulun tilakeskusten kanssa.

Ensiksi tarkastellaan energiankulutusta rakennusvuoden mukaan. tässä tarkastelussa oli tavoitteena selvittää miten energiamääräykset ovat vaikuttaneet vuosien saatossa ja määrittää vertailutaso energiankulutuksen vähenemisen tarkastelua varten.

Toisessa vaiheessa vertailtiin laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen keskinäistä suhdetta. Pääasiallisesti laskelmissa käytetyt tiedot ovat peräisin toteutussuunnitelmista. Osa tiedoista on myös peräisin RakMK osasta D5 (2012). Toinen laskentakierros suoritettiin suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä.

Tuloksia tarkasteltaessa on syytä huomata että case-kohteisiin kuuluvat Oulun rakennukset eivät ole mukana tarkastelussa, jossa tutkitaan rakennusvuoden vaikutusta energiankulutukseen. Tämä siksi että muista Oulun kohteista ei ole kulutustietoja ja ei olisi mielekästä ottaa otokseen mukaan vain uusimpia kohteita.

Lopuksi tarkasteltiin vielä muutamien indikaattorien vaikutusta energiankulutukseen. Tällä pyrittiin selvittämään olisiko yksinkertaisista indikaattoreista apua rakennuksen energiankulutuksen ennustamisessa, jotta ei jouduttaisi monimutkaisempaan laskentaan.

3.1 Kohteet

Tutkittavat kohteet ovat Tampereen, Helsingin ja Oulun kouluja ja päiväkoteja. Osatoenergian kulutus on laskettu yhteensä 22 opetusrakennukselle ja päiväkodille. Tampereelta mukana on kolme, Helsingistä kymmenen ja Oulusta yhdeksän kohdetta. Kohteet on rakennettu vuoden 2005 aikana tai sen jälkeen. Kahdessa kohteessa on niin suuri liikuntasali, että se täytyy laskea erillisenä. Suurin osa kohteista on lämmitetty kaukolämmöllä.

Toteutuneiden kulutustietojen vertailussa on mukana Tampereen ja Helsingin kouluja ja päiväkoteja. Päiväkoteja on Tampereella 128 ja Helsingissä 150, yhteensä 278. Tampereella kouluja on 111 ja Helsingissä 169, yhteensä 280. Mukaan otokseen on otettu kaikki rakennukset, joista kulutustiedot ovat olleet saatavissa. Otoksessa ei ole ammattikouluja. Toteutuneen kulutuksen tarkastelun ulkopuolelle on jätetty siirrettävät

tai väliaikaiset rakennukset, sekä usean käyttötarkoituksen rakennukset johtuen toteutuneen kulutuksen jakamisen mahdottomuudesta. Myös rakennukset, joiden kulutuksessa on mukana näitä väliaikaisia rakennuksia, on pyritty jättämään tarkastelun ulkopuolelle, mikäli tieto lisärakennuksesta on löytynyt.

3.2 Tutkimusmenetelmät

Kulutustiedot kerättiin Helsingin, Tampereen ja Oulun kohteista tilapalvelujen avustuksella. Toteutuneen kulutuksen tarkasteluun on otettu kulutustiedot vuodelta 2014. Lämmitysenergia suhteutettiin S17 lämmitystarvelukujen avulla. Oletuksena on, että rakennukset, jotka lämmittävät tiloja kaukolämmöllä lämmittävät lämpimän käyttöveden myös kaukolämmöllä. Koska lämpimän käyttöveden määriä harvoin tunnetaan, on lämpimän käyttöveden osuus mukana normitetussa energiassa. Tämän menettelyn vaikutus normittamisen aiheuttamaan virheeseen riippuu todellisen lämmitystarveluvun suhteesta referenssilämmitystarvelukuun ja käytetyn lämpimän veden määrästä.

Lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvan energian osuus on mukana rakennusten skaalatussa lämmitysenergiassa. Vaikutuksen suuruus riippuu lämpimän käyttöveden määrästä ja todellisen lämmitystarveluvun suhteesta referenssivuoden lämmitystarvelukuun:

$$Q_{lkv} \frac{S_{ref}}{S_{real}} \quad (3.1)$$

Ajatellaan lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvan energian olevan luokkaa 10 kWh/brm² (vertaa: RakMK D3 (2012) mukaan 11 kWh/m²_{netto}). Lämmitystarvelukujen suhde (S_{ref}/S_{real}) vuonna 2014 Helsingissä on 1,15, Tampereella 0,98 ja Oulussa 0,86. Menettelyn vaikutus Tampereella on +0,20 kWh/brm², Helsingissä −1,50 kWh/brm² ja Oulussa +2,12 kWh/brm².

Energiankulutuksen laskenta on suoritettu Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Laskelmissa käytettiin RakMK D5 (2012) laskentakaavoja ja taulukkoarvoja. Ensimmäinen laskentakierros tehtiin RakMK D3 (2012) mukaisella standardikäytöllä ja säävyöhykkeen I-II ilmastolla. Toinen laskentakierros suoritettiin suunnitelmien mukaisilla ilmamäärillä ja paikallisessa ilmastossa. Käytännössä ilmaston vaihtaminen koski vain Oulun kohteita. Käytetyt säätiedot on esitetty liitteessä A tai RakMK D3 (2012) liitteessä 2.

Toteutunut kulutus on pääosin case-kohteille vuodelta 2015. Tässä haluttiin hyödyntää mahdollisimman viimeaikaista tietoa, jotta uudempien rakennusten käytöllä olisi ollut mahdollisimman pitkä aika vakautua. Muutamalle kohteelle on valittu toinen kulutusjakso: Yhdessä kohteessa on rakennettu lisärakennus, yhdessä kohteessa lämmöntal-

teenotto oli rikkoutunut yhdestä ilmanvaihtokoneesta ja kahdessa kohteessa oli kulutslukemissa ongelmia.

Sisäpuoliseen teholliseen ominaislämpökapasiteettiin sovellettiin toimistorakennusten arvoja, jotka ovat nähtävillä taulukossa 2.20. Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon pituus laskettiin kertomalla lämmitetty nettopinta-ala arvolla $0,020 \text{ m}^2$.

Lämmitysjärjestelmiin kuuluvien pumppujen ja muiden pumppujen sähköenergiankulutus on laskettu soveltaen kaavaa (2.5). Rakennuksissa, joissa on patteri- ja lattialämmitys, on lämmöntarve jaettu huoneiden pinta-alojen suhteen. Huoneissa, joissa on sekä patteri- että lattialämmitys, on tilan lämmitystarpeesta laskettu puolet kummallekin järjestelmälle.

Rakennusten U-arvot otettiin suunnitelmien rakenneleikkauksien piirustuksista. Mikäli alapohjan lämmönläpäisylle ilmoitettiin reuna- ja sisäalueen lämmönläpäisykerroin, käytettiin laskelmissa sisäalueen lämmönläpäisykerrointa. Yhdelle kohteelle laskettiin alapohjan sisäalueen U-arvo, koska sitä ei ilmoitettu suunnitelmissa, käyttäen RakMK osan C4 (2003) normaalisia lämmönjohtavuuksia: Paisutetulle polystyreenille $\lambda_n=0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ja betonille $\lambda_n=1,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Maan lämmönvastus R_b on $3,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Ikkuna- ja oviliitoksien kylmäsilloille on tehty oletus, että karmi peittää 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta. Tällöin kylmäsillalle käytetään arvoa $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Ikkunoiden läpi tulevalle säteilylle jouduttiin tekemään useita oletuksia. Ikkunoille, joiden kehäkerrointa ei ole saatu laskettua, käytettiin arvoa 0,75. Ikkunoiden g-arvo oli harvoin ilmoitettu suunnitteludokumenteissa, jolloin käytettiin g-arvona 0,5:ttä. Mikäli ikkuna sijaitsee U:n mallisella sisäpihalla, on sivuvarjostuskertoimelle käytetty 60° arvoa. Ikkunoiden sivu- ja ylävarjostuksen asteluvut on pyöristetty viiden asteen tarkkuudella ja väliarvot on interpoloitu. Ympäristön varjostuksen korjauskertoimet $F_{\text{ympäristö}}$ on pyöristetty joko 15° tai 45° , siten että 30° pyöristyy ylöspäin. Väli-ilmansuunnat on interpoloitu varjostuksien laskennassa.

Ilmanvuotolukuna käytettiin mittausarvoja tai suunnitelmiin kirjattuja arvoja. Osassa kohteita ilmanvuotolukua ei ollut saatavilla lainkaan, jolloin käytettiin ohjeen mukaisista arvoa, jolloin q_{50} on $4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$.

Kohteet, joissa on tarpeenmukainen ilmanvaihto, on laskettu suunnitelmien mukaisilla ilmamäärillä. Tarpeenmukaisesti ohjattujen ilmanvaihtojärjestelmien sähkönkulutus on laskettu kaavan (2.61) mukaan, ilman erillisiä menetelmiä. Oviverhokojeilla on ilmanvaihdon kanssa sama käyntiaika. Ylilämmönpoistojärjestelmiä ja liesituulettimia ei ole huomioitu laskelmissa. Lämmöntalteenottolaitteiden lämpötilahyötysuhteet on laskettu sijaintia vastaavassa ilmastossa, koska muuta tietoa ei ole ollut saatavilla.

Kohteiden ilmanvaihtokoneiden ja -järjestelmien ilmanvaihdon vuosihyötysuhteet laskettiin laskentapalvelut.fi laskurilla siten, että jäteilman minimilämpötila on $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämmityskauden raja $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$, tuloilman maksimilämpötila on sama kuin sisäänpuhalluslämpötila ja huonelämpötilan asetusarvo on $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$. LTO ja ilmanvaihdon lämmitys eivät ole päällä kesä-, heinä- ja elokuussa.

Jos lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila on suurempi kuin sisäänpuhalluslämpötila, rajoitetaan taulukkolaskennassa lämmöntalteenoton jälkeistä lämpötilaa siten, että maksimiarvo on sisäänpuhalluslämpötila vähennettynä lämpötilan nousulla tuloilmapuhaltimessa. Käyntiajan ulkopuolinen ilmanvaihto hoidetaan rakennuksen isoimmalla ilmanvaihtokoneella.

Tutkimuksessa tehtiin toinen laskentakierros suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä, säilyttäen kuitenkin standardinmukainen käyntiaika ja käyntiajan ulkopuolinen ilmanvaihto ennallaan. Tämän lisäksi Oulun kohteiden ilmasto vaihdettiin säävyöhykkeestä I vyöhykkeeseen III. Tämä vaikuttaa auringon lämpökuormiin ja ulkoilman lämpötilaan.

Hyviä ja yksinkertaisia tunnusmerkkejä rakennuksen energiatehokkuuden ennustamiseksi jo suunnitteluvaiheessa on tutkittu kolmella eri kuvaajalla. Valitut suureet H_{tot} , $Q_{\text{johtuminen}}$ ja A_{vaippa} on suhteutettu nettopinta-alaan ja niiden vaikutusta tarkastellaan standardikäytön mukaiseen laskennalliseen sekä toteutuneeseen energiankulutukseen.

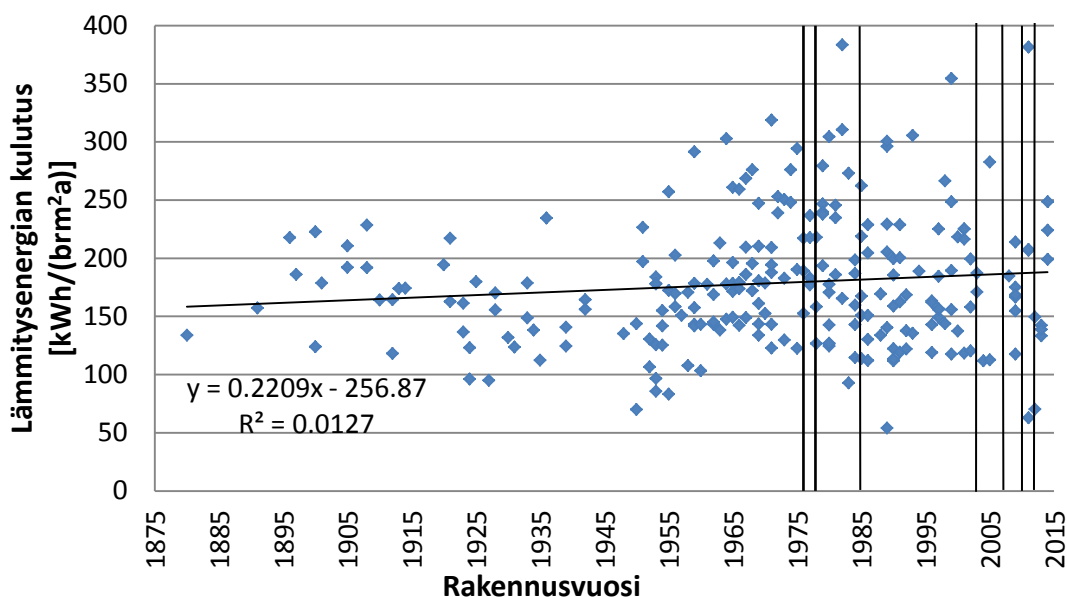
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa käsitellään ensiksi vanhempaa rakennuskantaa ja sen jälkeen case-kohteiden energiankulutusta. Laskentatuloksien lisäksi luvun lopussa on pohdittu hie-
man laskentamenetelmän toimivuutta sekä arvioitu virhelähteitä. Toteutunutta kulutus-
ta on tarkasteltu aluksi siten, että päiväkodit ja koulut ovat yhtenä ryhmänä, kuten
RakMK D3 (2012) luokittelee rakennukset. Alaluvussa 4.1.1 on lisäksi vertailtu kou-
lujen ja päiväkotien energiankulutusta keskenään.

4.1 Toteutunut energiankulutus rakennusvuoden mukaan

Osassa kohteita on useampia rakennuksia, ja osa näistä lisärakennuksista saattaa olla
väliaikaisia rakennuksia, joita eivät koske yhtä tiukat energiamääräykset kuin pysyviä
rakennuksia. Väliaikaisia lisärakennuksia sisältävät kohteet on pyritty poistamaan.
Mikäli lisärakennus on jäänyt huomaamatta, energiankulutus neliötä kohden on suu-
rempi kuin todellisuudessa. On myös mahdollista, että rakennuksissa on tiloja tyhji-
lään, mikä voi nostaa tai laskea energiankulutusta: Ilmanvaihdon kytkeminen pois
päältä säästää energiaa, mutta lämpökuormien puuttuminen voi kasvattaa lämpöener-
giantarvetta.

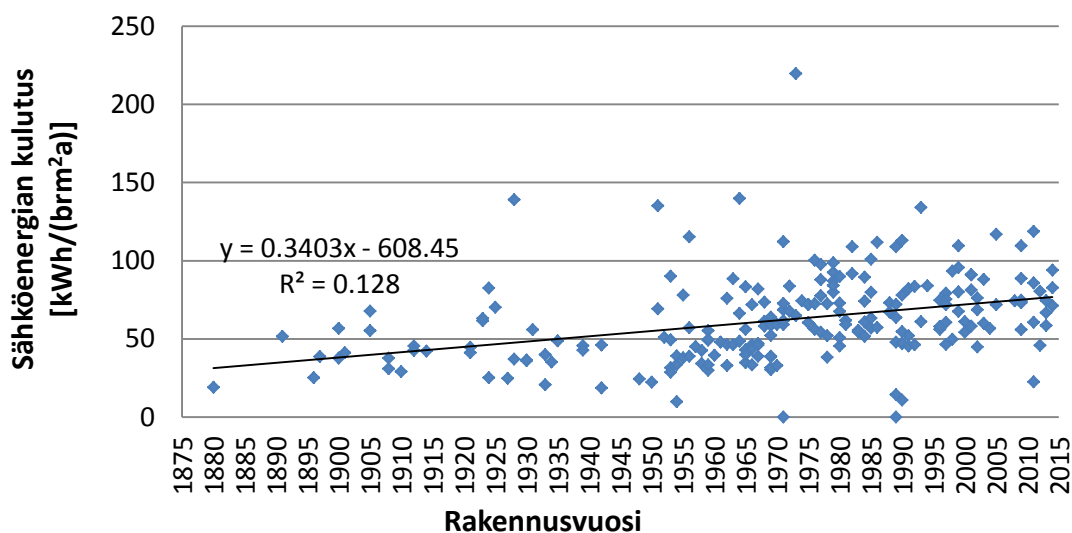
Koulujen ja päiväkotien toteutunutta energiankulutusta tutkittiin rakennusvuoden suh-
teen. Kuvassa 4.1 nähdään koulujen ja päiväkotien testivuoden Vantaa 2012 tasoon
normeerattu vuoden 2014 lämmitysenergian vuosikulutuksen suhtautuminen raken-
nusvuoteen. Samassa kuvassa nähdään myös energiamääräysten muutosvuodet pysty-
viivoina.



Kuva 4.1 Tampereen ja Helsingin koulujen ja päiväkotien ($n=238$) testivuoteen (Vantaa 2012) normeerattu lämmitysenergian kulutus vuonna 2014. Pysyivät kuvaavat energiamääräysten muutosvuosia.

Teoriassa energiamääräysten muutosten olisi pitänyt pienentää rakennusten energiankulutusta, mutta kuvassa 4.1 vaikutus ei näy. Muutamit 2010-luvun kohteet ovat saavuttaneet huomattavan pieniä lämmitysenergiankulutuksia: 62,7 kWh/brm² ja 70,3 kWh/brm².

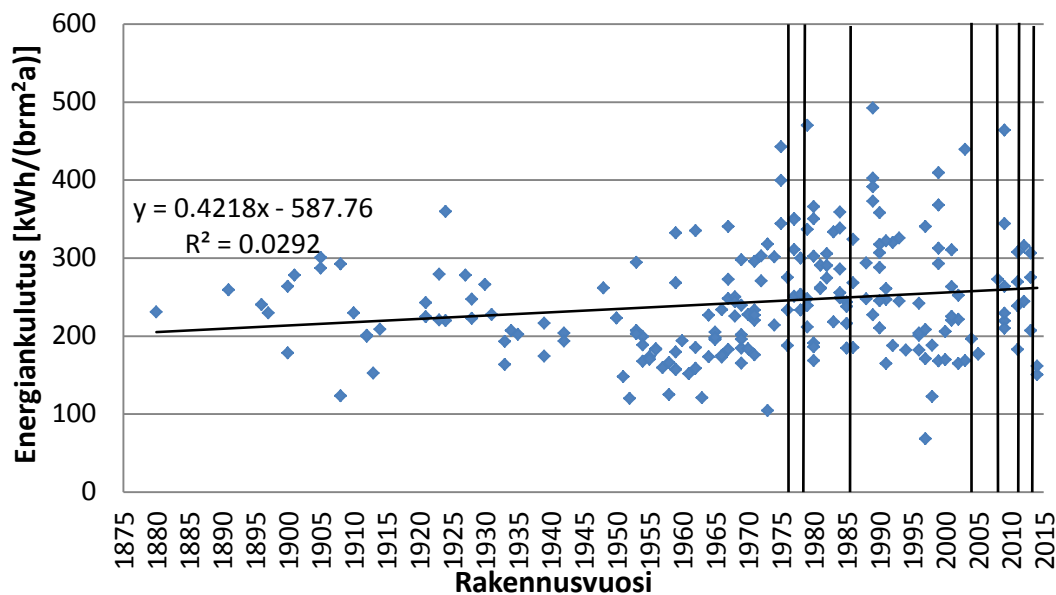
Kuvassa 4.2 nähdään koulujen ja päiväkotien vuoden 2014 sähköenergian kulutuksen suhtautuminen rakennusvuoteen.



Kuva 4.2 Tampereen ja Helsingin koulujen ja päiväkotien ($n=213$) toteutunut sähköenergian kulutus vuonna 2014.

Kuvasta 4.2 nähdään, että 1950-luvulta alkaen, sähköenergian kulutus on lisääntynyt kouluissa ja päiväkodeissa. Kuvassa 4.3 nähdään vuoden 2014 normeerattu energian-

kulutuksen suhde rakennusvuoteen. Lämmitysenergia on normeerattu testivuoden Vantaa 2012 tasoon.



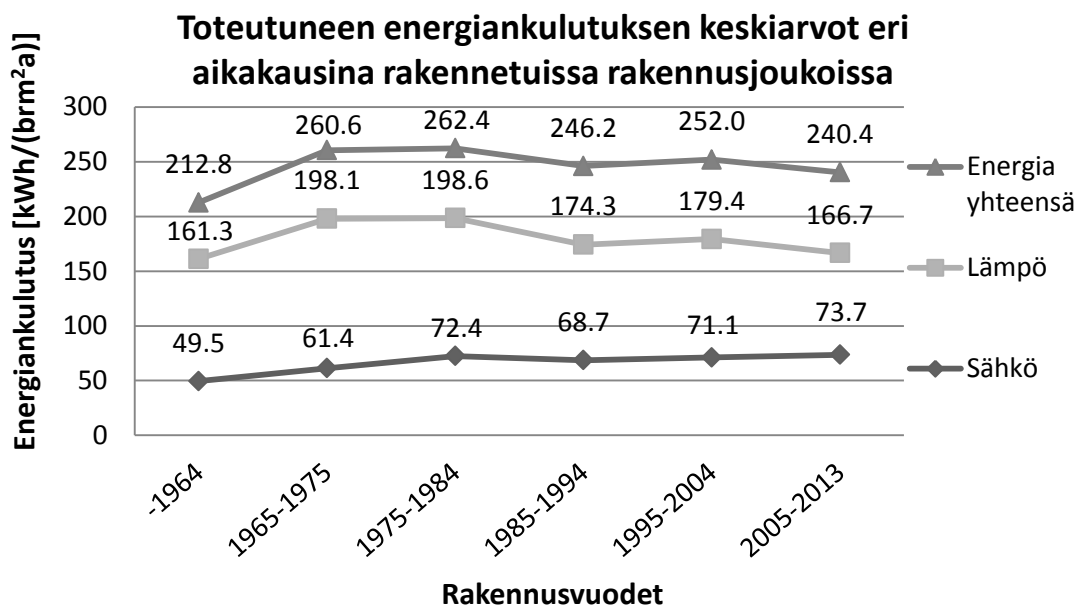
Kuva 4.3 Tampereen ja Helsingin koulujen ja päiväkotien ($n=224$) testivuoteen (Vantaa 2012) normeerattu energian kulutus yhteensä vuonna 2014. Pystyviivat kuvaavat energiamääräysten muutosvuosia.

Lämmön, sähkön ja energian kulutuksesta saatiin nouseva trendi näissä tarkasteluissa. Tarkasteltaessa koko joukon sijaan kulutusta jakaen rakennukset rakennusvuoden mukaan vuosikymmeniin, saadaan taulukossa 4.1 nähtävillä olevat arvot. Vuonna 2014 rakennetut rakennukset on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, koska Helsingin, Tampereen ja Oulun tilakeskuksien mukaan ilmanvaihtolaitteet käyvät uusissa rakennuksissa jatkuvasti ensimmäisen vuoden tai jopa kaksi vuotta, mikä lisää energiankulutusta huomattavasti.

Taulukko 4.1 Eri-ikäisten rakennusjoukkojen lukumäärät sekä sähkön, lämmön ja energiankulutuksien keskiarvot vuonna 2014.

Rakennusvuosi	Sähkö (kWh/(brm ² a)) Ikm		Lämpö (kWh/(brm ² a)) Ikm		Energia yhteensä (kWh/(brm ² a)) Ikm	
2005–2013	73,7	16	166,7	16	240,4	16
1995–2004	71,1	26	179,4	28	252,0	26
1985–1994	68,7	27	174,3	34	246,2	27
1975–1984	72,4	33	198,6	38	262,4	33
1965–1975	61,4	35	198,1	37	260,6	35
–1964	49,5	71	161,3	80	212,8	70

Energiankulutuksen muutoksia on havainnollistettu lisäksi kuvassa 4.4.

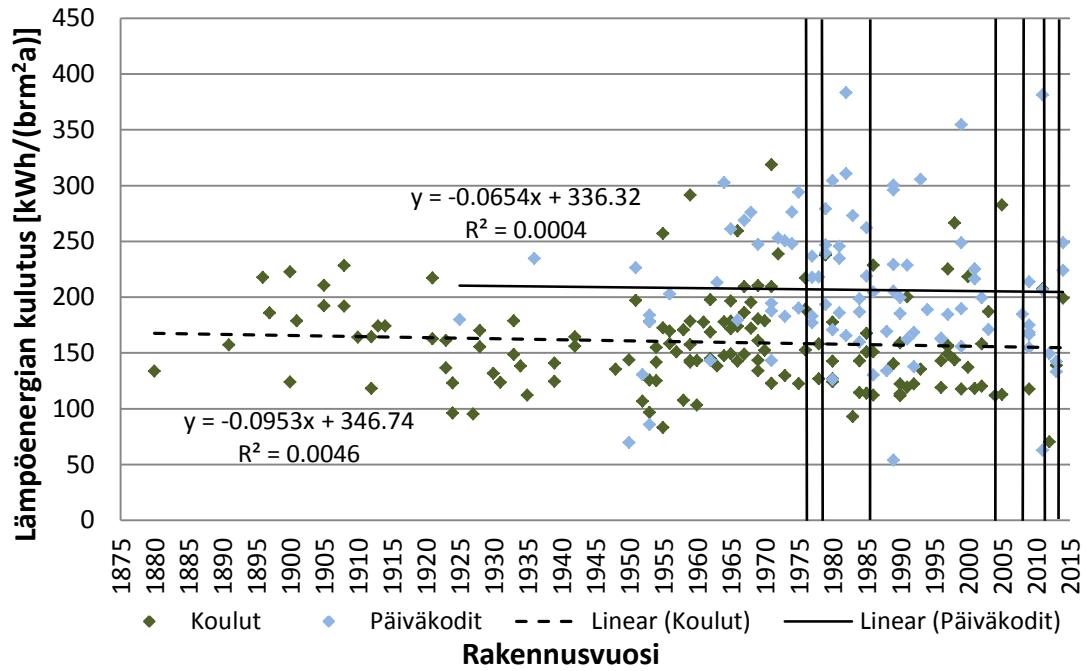


Kuva 4.4 Toteutuneen energiankulutuksen keskiarvoja eri aikakausina rakennetuissa päiväkotien ja koulurakennusjoukoissa Tampereella ja Helsingissä.

Kuvasta 4.4 nähdään että lämmön ja energiankulutus on laskenut ja sähkönkulutus on kasvanut. Tässä otoksessa kaikista eniten energiaa kuluttava rakennusjoukko on rakennettu 1975–1984. Kahden viimeisimmän rakennusjoukon välillä energiankulutuksen ero on yhteensä 4,6 %. Lämpöenergiankulutus on samalla aikavälillä laskenut 7,1 % ja sähkönkulutus on noussut 3,7 %.

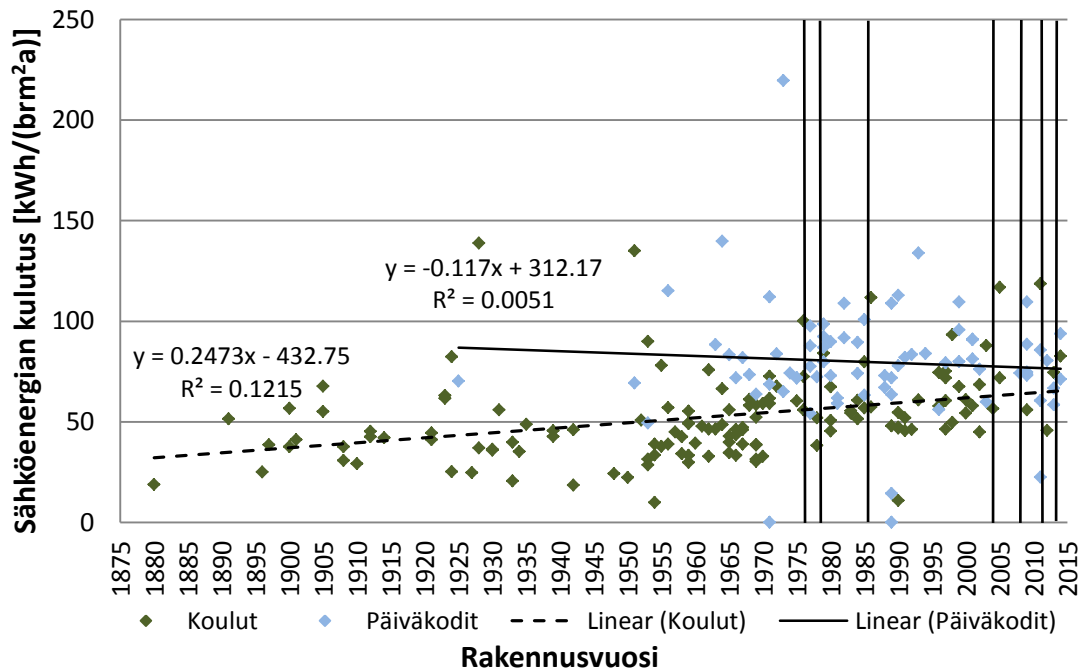
4.1.1 Koulujen ja päiväkotien energiankulutuksen erot

Tässä alaluvussa tarkastellaan koulu- ja päiväkotirakennuksien energiankulutusten eroja toteutuneen kulutuksen perusteella. Kuvassa 4.5 nähdään eroteltuna koulujen ja päiväkotien lämpöenergian kulutus. Lämpöenergian kulutus on normeerattu testivuoteen Vantaa 2012.



Kuva 4.5 Tampereen ja Helsingin koulujen ($n=143$) ja päiväkotien ($n=95$) normitettu (Vantaa 2012) lämpöenergiankulutus vuonna 2014.

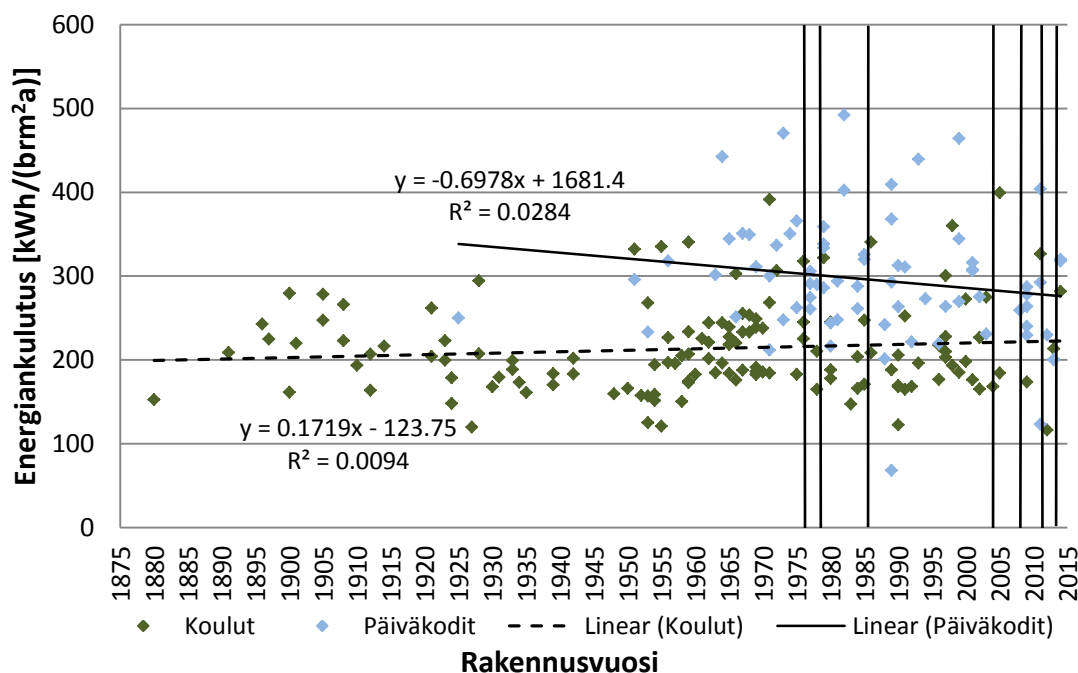
Kuvasta 4.5 huomataan, että päiväkodit kuluttavat lämpöenergiaa tyypillisesti enemmän. Kuvassa 4.6 on esitetty koulujen ja päiväkotien sähköenergian kulutus.



Kuva 4.6 Tampereen ja Helsingin koulujen ($n=139$) ja päiväkotien ($n=74$) sähköenergian kulutus vuonna 2014.

Kuvasta 4.6 huomataan että sähköenergian kulutus on vanhemmissa päiväkodeissa suurempaa, mutta kulutukset alkavat limittyä 2000-luvulla. Kuvassa 4.7 on esitetty

koulujen ja päiväkotien energiankulutusten summa, jossa lämpöenergian kulutus on normeerattu testivuoteen Vantaa 2012.



Kuva 4.7 Tampereen ja Helsingin koulujen ($n=136$) ja päiväkotien ($n=74$) energiankulutus yhteensä vuonna 2014.

Kuvasta 4.7 voidaan nähdä että myös yhteenlaskettu energiankulutus on suurempi päiväkodeissa kuin kouluissa. Näistä kuvaajista voidaan päätellä, että päiväkodit eivät neliöperusteisena ole yhtä energiatehokkaita kuin koulut.

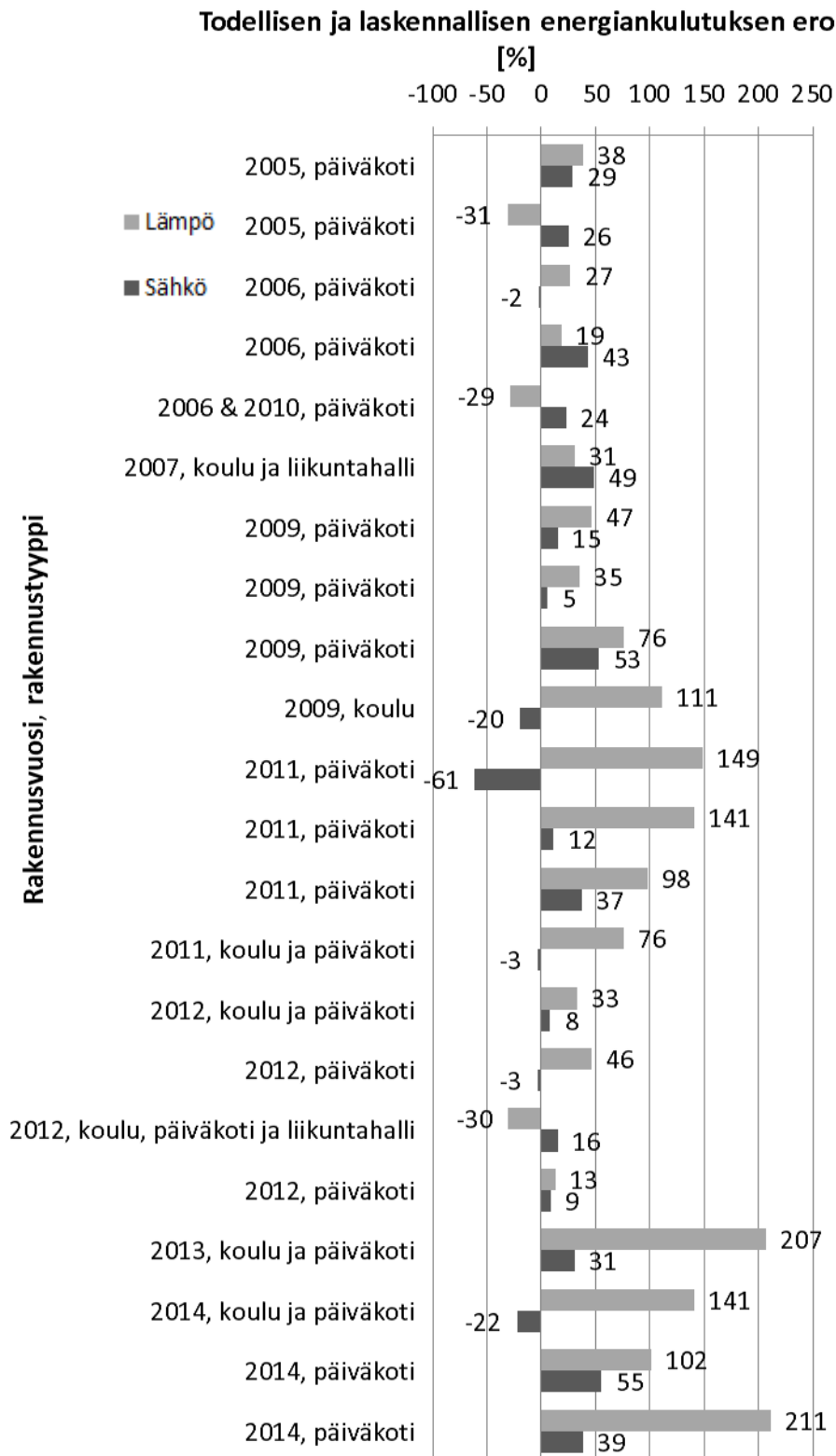
4.2 Case-kohteiden laskennallisen ja toteutuneen energiankulutuksen vertailu

Tässä alaluvussa tarkastellaan laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen välisiä eroja. On syytä huomata, että lähes kaikissa case-kohteissa on olemassa keittiö ja ruokala, jotka lasketaan kuuluvaksi muuhun rakennukseen ja ammattikeittiötä ei huomioida, kuten alaluvun 2.3 alussa on mainittu. Jäähdytystarvetta ei myöskään tarvitse laskea yksittäisille tiloille, joten keittiön jäähdytys laitteita ei ole otettu huomioon laskelmissa.

Edellisessä kappaleessa esitettyssä otoksessa on mukana ainoastaan Helsingin ja Tampereen rakennuksia. Tässä luvussa on lisäksi mukana kohteita Oulusta.

Case-kohteille lasketut ostoenergian kulutukset on esitetty liitteessä B. Taulukossa B.3. on esitetty kulutusjaksot ja muut huomioon otettavat asiat laskennasta. Taulukoon on liitetty toteutunut lämpöenergian kulutus normitettuna lämmitystarveluvuilla ja sähköenergian kulutus.

Kuvassa 4.8 on esitetty toteutuneen kulutuksen prosentuaalinen ero laskennalliseen energiankulutukseen nähden. Kuvasta huomataan, että lämmönkulutuksen prosentuaalinen ero laskennalliseen kulutukseen vaihtelee huomattavasti enemmän kuin sähkönkulutus. Vain muutama kohde alittaa laskennallisen kulutuksen lämmön- tai sähkönkulutuksen osalta. Kuvasta 18 nähdään myös että vuonna 2011 ja 2013 jälkeen rakennetut rakennukset kuluttavat paljon energia suhteessa laskennalliseen energiankulutukseen. Tuloksista huomataan, että joissain kohteissa toteutunut lämpöenergian kulutus on yli kaksinkertainen laskettuun nähden.



Kuva 4.8 Toteutuneen ja laskennallisen energiankulutuksen prosentuaalinen ero case-kohteissa.

Tuloksista saadaan prosentuaalisten erojen keskiarvoksi lämpöenergian kulutukselle +68,6 % ja sähköenergian kulutukselle +15,2 %. Energiankulutukselle yhteensä vastaava luku on +41,3 %. Keskihajonta prosentuaalisille eroille on lämpöenergialle 69,9

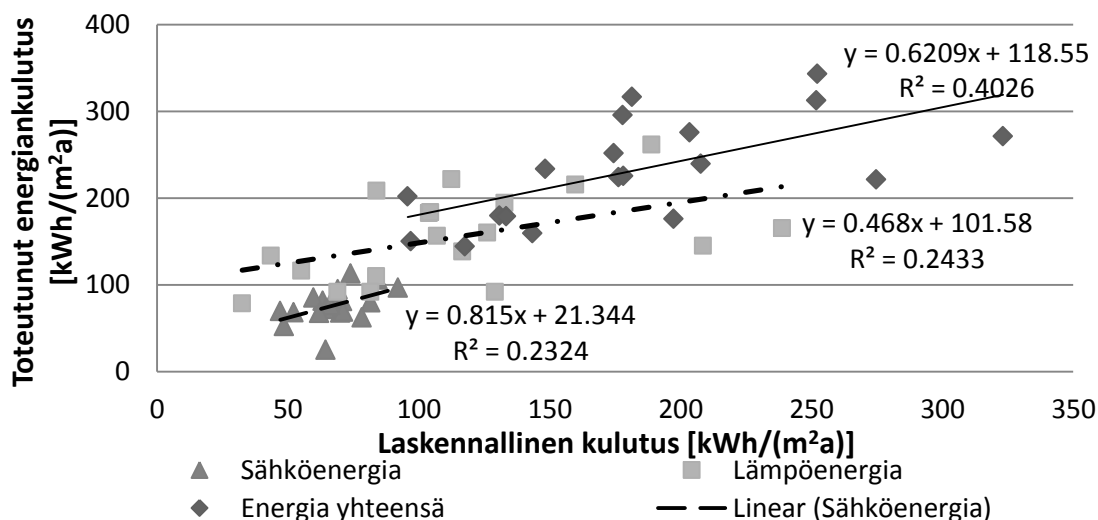
%, sähköenergialle 27,9 % ja yhteenlasketulle energialle 37,3 %. Kohteiden laskennallisen ja toteutuneen sähköenergiann, lämpöenergian ja niiden summien keskiarvot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Case-kohteiden (2005–2014) laskennallisen ja toteutuneen sähkön, lämmön ja energiankulutuksen keskiarvot nettoneliötä kohden.

	Sähkö (kWh/(m ² a))	Lämpö (kWh/(m ² a))	Energia yhteensä (kWh/(m ² a))
Laskennallinen	67,6	110,7	178,3
Toteutunut	77,6	162,9	240,5

Jos tarkasteluista jätetään pois vuonna 2014 rakennetut rakennukset, (koska niissä ilmastointi on ollut jatkuvasti päällä kulutusjakson aikana) saadaan prosentuaalisten erojen keskiarvoksi lämpöenergialle +55,7 %, sähköenergialle +14,0 % ja energialle yhteensä +33,4 %. Keskihajonta on lämpöenergialle 63,5 %, sähköenergialle 26,5 % ja energialle yhteensä 31,8 %. Etenkin lämmönkulutuksen laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen erojen hajonta on suuri. Vuonna 2014 rakennettujen kohteiden rajaaminen pois pienentää hajontaa hieman.

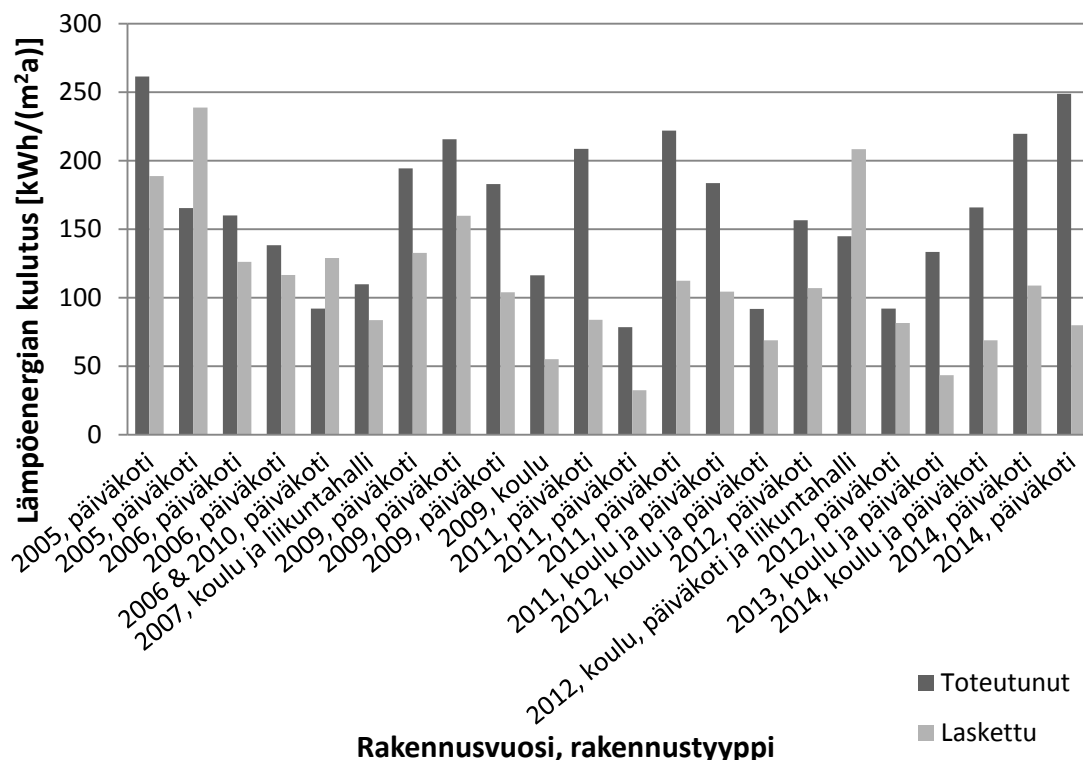
Tarkastellaan vielä, kuinka hyvin laskennallisen energiankulutuksen tunteminen auttaa ennustamaan toteutunutta energiankulusta. Kuvassa 4.9 on esitetty eri energiamuotojen laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen yhteys.



Kuva 4.9 Laskennallisen ja toteutuneen energiankulutuksen korrelaatio case-kohteissa (2005–2013).

Jos laskennallinen kulutus vastaisi toteutunutta kulutusta, saataisiin funktioksi $y=x$. Lähinnä tätä yhtälöä on sähköenergian kulutuksen trendiviivan yhtälö. Keskihajonta yhtälön antamien ja toteutuneiden kulutuksien erotukselle on sähkölle 17,2 kWh/(m²a), lämmölle 44,8 kWh/(m²a) ja energialle yhteensä 45,9 kWh/(m²a).

Tarkastellaan seuraavaksi case-kohteiden energiankulutusta nettoneliötä kohden. Tarkemmat lukuarvot lasketuista kulutuksista ovat nähtävissä liitteessä B. Kuvassa 4.10 nähdään case-kohteiden toteutunut lämpöenergian kulutus nettoneliötä kohden.



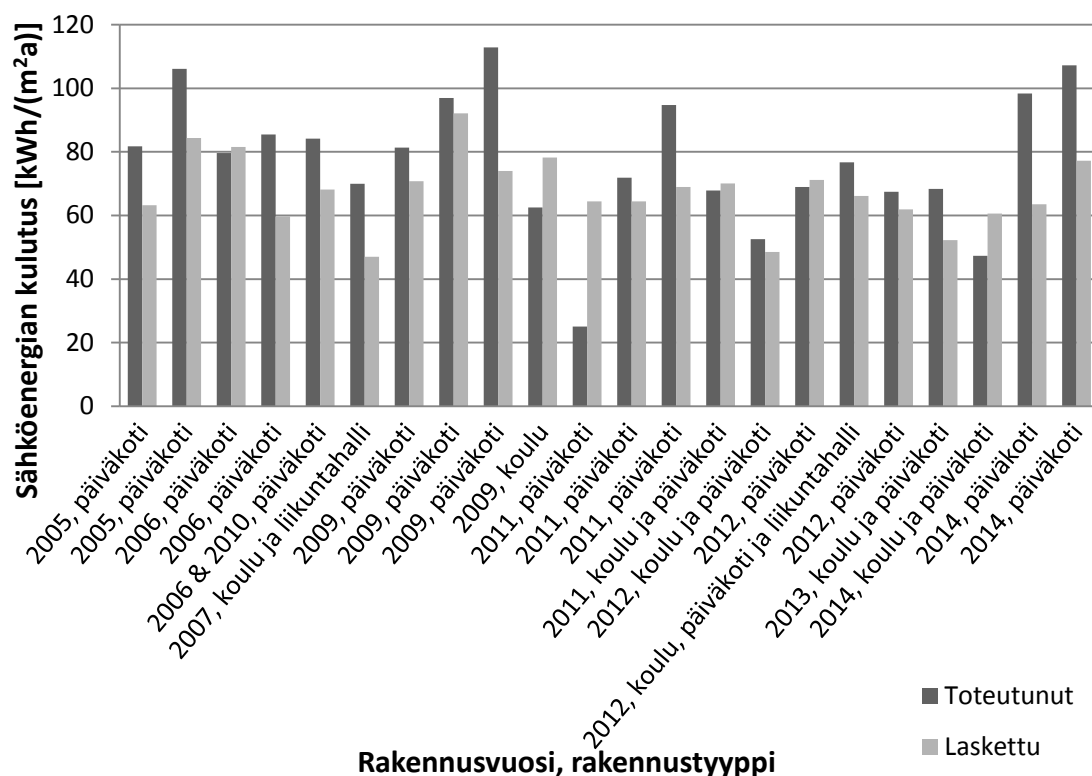
Kuva 4.10 Case-kohteiden laskettu ja toteutunut lämpöenergiankulutus nettoneliötä kohden.

Taulukossa 4.3 on esitetty case-kohteiden laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen tunnuslukuja.

Taulukko 4.3 Case kohteiden (2005–2014) toteutuneen ja laskennallisen lämpöenergian kulutuksen tunnuslukuja

	Mediaani (kWh/(m²a))	Keskiarvo (kWh/(m²a))	Keskihajonta (kWh/(m²a))	Minimi (kWh/(m²a))	Maksimi (kWh/(m²a))
Laskennallinen	105,7	110,7	51,7	32,5	238,8
Toteutunut	162,8	162,9	53,3	78,5	261,6

Kuvassa 4.11 on esitetty case-kohteiden toteutunut ja laskennallinen sähköenergian kulutus. Kuvaajasta huomataan että laskennallinen sähköenergiankulutus on vähemmän vaihtelevaa kuin toteutunut sähköenergiankulutus.



Kuva 4.11 Case-kohteiden laskettu ja toteutunut sähköenergian kulutus nettoneliötä kohden.

Taulukossa 4.4 on esitetty case-kohteiden toteutuneen ja laskennallisen sähköenergian kulutuksen tunnuslukuja.

Taulukko 4.4 Case kohteiden (2005–2014) toteutuneen ja laskennallisen sähköenergian kulutuksen tunnuslukuja.

	Mediaani (kWh/(m²a))	Keskiarvo (kWh/(m²a))	Keskihajonta (kWh/(m²a))	Minimi (kWh/(m²a))	Maksimi (kWh/(m²a))
Laskennallinen	67,2	67,6	11,1	47,0	92,1
Toteutunut	78,2	77,6	20,9	25,0	112,8

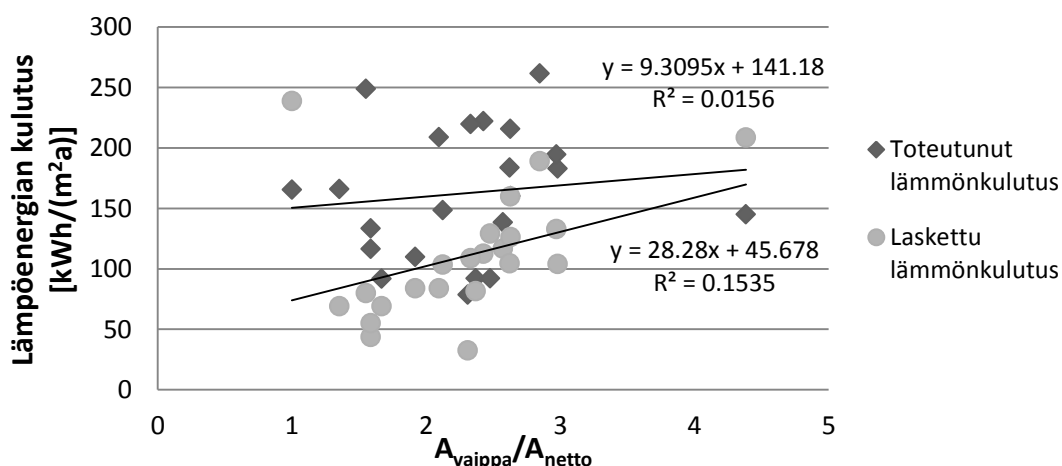
Kuvassa 4.12 on esitetty case-kohteiden toteutunut ja laskennallinen energiankulutus.

Taulukko 4.6 Case kohteiden (2005–2013) toteutuneen energiankulutuksen tunnuslukuja.

	Mediaani (kWh/(brm ² a))	Keskiarvo (kWh/(brm ² a))	Keskihajonta (kWh/(brm ² a))	Minimi (kWh/(brm ² a))	Maksimi (kWh/(brm ² a))
Sähköenergia	69,1	69,8	17,5	23,0	101,4
Lämpöenergia	144,2	141,1	44,4	70,7	221,0
Energia yhteensä	214,5	210,9	50,5	135,5	290,1

Toteutuneen lämmönkulutuksen keskiarvo case-kohteissa 2005–2013 on 141,1 kWh/(brm²a) ja 1995–2004 keskiarvo on 179,4 kWh/(brm²a). Kulutukset on normeerattu testivuoteen Vantaa 2012. Lämpöenergiankulutus on siis keskiarvon perusteella laskenut lähes 40 kWh/(brm²a), eli enemmän kuin aluvussa 4.1 on esitetty. Toteutuneen sähkönkulutuksen keskiarvo case-kohteissa, jotka on rakennettu 2005–2013, on 69,8 kWh/(brm²a) ja 1995–2004 keskiarvo on 71,1 kWh/(brm²a). Sähköenergiankulutus on siis vähentynyt hieman tässä tarkastelujoukossa. Yhteenlasketun energiankulutuksen keskiarvo case-kohteille 2005–2013 on 210,9 kWh/(brm²a) ja 1995–2004 keskiarvo on 252,0 kWh/(brm²a). On syytä huomata että näitä muutoksia energiankulutuksessa ei voida suoraan katsoa vähenemiseksi, sillä Oulun kohteita ei ole mukana 1995–2004 vertailuarvoissa. 2005–2013 case-kohteissa on mukana yhdeksän kohdetta Oulusta. Normeeraamisen jälkeen Oulun case-kohteet kuluttavat keskimäärin vähemmän lämmitysenergiaa kuin Helsingin case-kohteet, joita on myös yhdeksän 2005–2013 joukossa. Oulun kohteet kuluttavat lämmitysenergiaa keskimäärin 129,1 kWh/brm² ja Helsingin kohteet 160,9 kWh/brm².

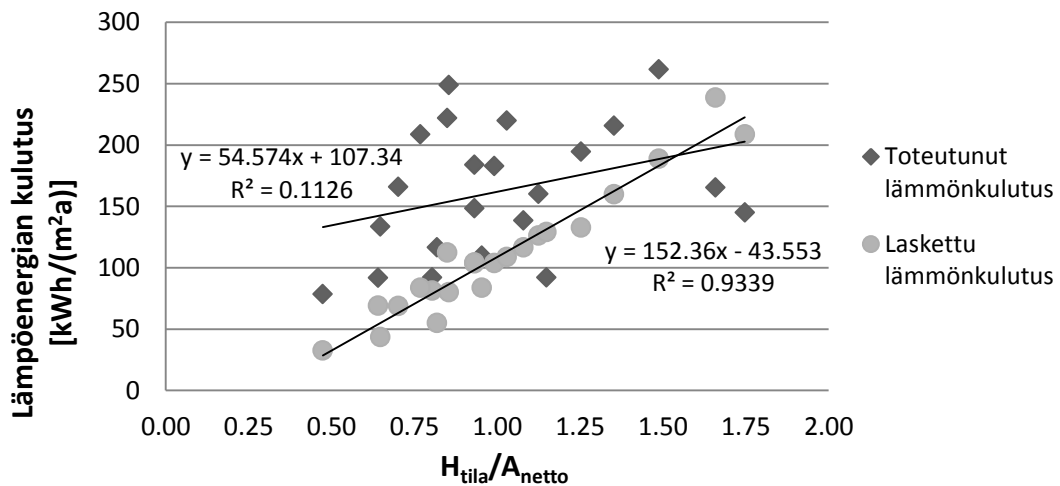
Tutkitaan seuraavaksi eräitä rakennuksen energiatehokkuuteen liittyviä tunnuslukuja standardikäytöllä laskettujen case-kohteiden osalta. Myös vuoden 2014 kohteet ovat mukana tarkastelussa. Vaipan pinta-alan ja rakennuksen nettopinta-alan suhteella voidaan tutkia rakennuksen muodon vaikutusta rakennuksen lämpöenergian kulutukselle. Saatujen tulosten mukainen kuvaaja on esitetty kuvassa 4.13.



Kuva 4.13 Rakennuksen vaipan pinta-alan suhde rakennuksen nettopinta-alaan: Vaikutus laskennalliseen ja toteutuneeseen lämpöenergian kulutukseen päiväkodeissa ja kouluissa.

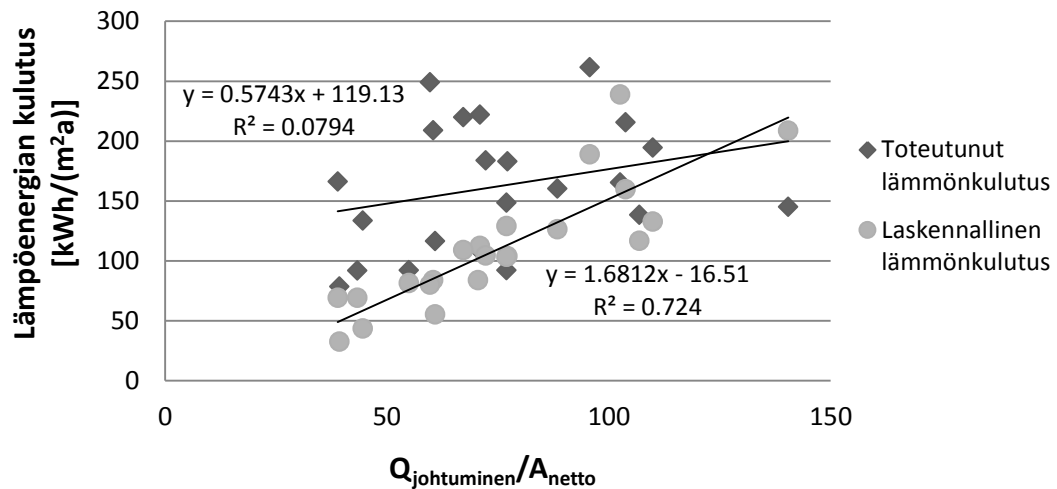
Vaipan pinta-alan ja rakennuksen nettopinta-alan suhteen vaikutus lämpöenergian kulutukseen näkyy jossain määrin laskennallisessa kulutuksessa, mutta toteutuneessa kulutuksessa ei oikeastaan voida sanoa että $A_{\text{vaippa}}/A_{\text{netto}}$ -suhteella olisi merkittävä yhteys lämpöenergiankulutukseen.

Ominaislämpöhäviöiden ja rakennuksen nettopinta-alan suhteen vaikutus lämpöenergiankulutukseen on nähtävissä kuvassa 4.14. Kuvaajasta nähdään, että laskennallinen kulutus noudattaa hyvin ominaislämpöhäviöiden suhdetta pinta-alaan, sillä R^2 on lähes 1. Toteutunut lämmönkulutus korreloi vähemmän ominaislämpöhäviön ja rakennuksen nettopinta-alan suhteeseen, sillä kuvaaja on loivempi ja R^2 on noin 0,11.



Kuva 4.14 Ominaislämpöhäviön ja rakennuksen nettopinta-alan suhde: Vaikutus laskennalliseen ja toteutuneeseen lämpöenergian kulutukseen päiväkodeissa ja kouluissa.

Tarkasteltaessa ominaislämpöhäviöiden sijaan johtumislämpöhäviöitä, saadaan kuva 4.15. Laskettujen ominais- ja johtumislämpöhäviöiden keskinäistä paremmuutta verrattaessa huomataan että johtumislämpöhäviöissä on enemmän hajontaa, sillä R^2 arvo pienenee noin 0,2:lla. Tämä johtunee siitä, että johtumislämpöhäviöt eivät ota huomioon ilmanvaihdon tai vuotoilman vaikutuksia.

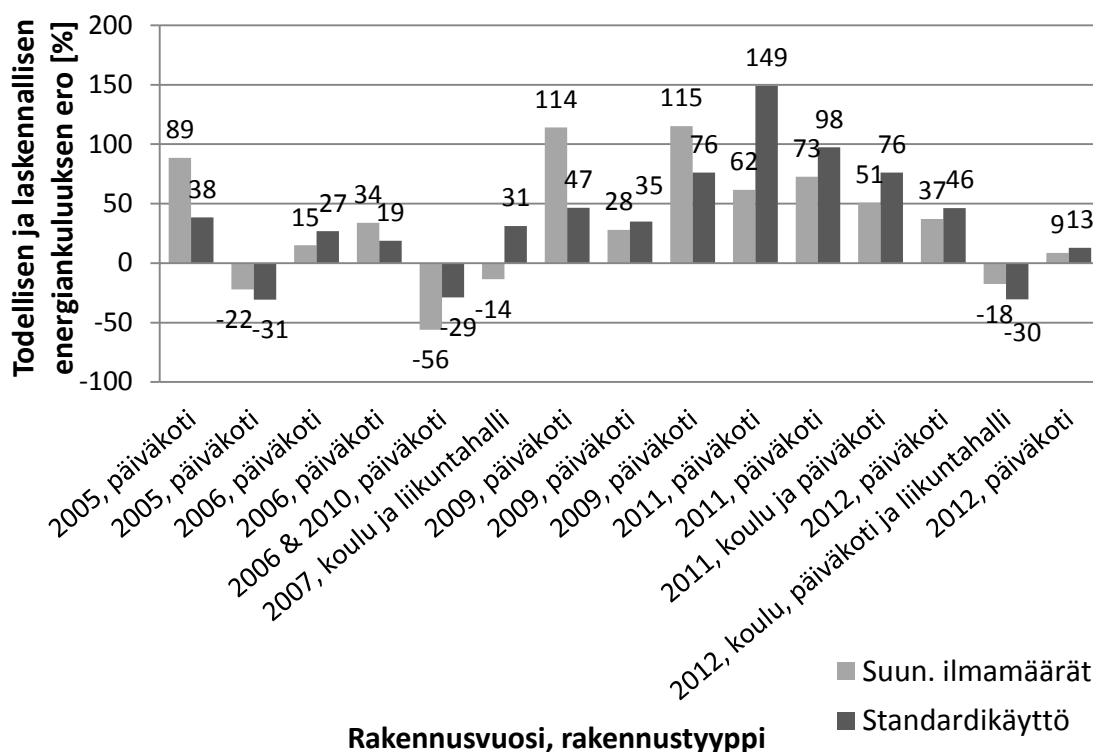


Kuva 4.15 Johtumislämpöhäviön ja nettopinta-alan suhteen vaikutus rakennuksen lämpöenergian kulutukseen päiväkodeissa ja kouluissa.

Näin ollen näistä energiatehokkuuden mittareista ominaislämpöhäviöt vastaavat parhaiten laskennallista lämpöenergian kulutusta. Toisaalta mikään suureista ei vastaa kovin hyvin toteutunutta lämpöenergian kulutusta.

4.2.1 Energiankulutusten vertailu suunnitelluilla ja standardikäytön mukaisilla ilmamäärillä case-kohteissa

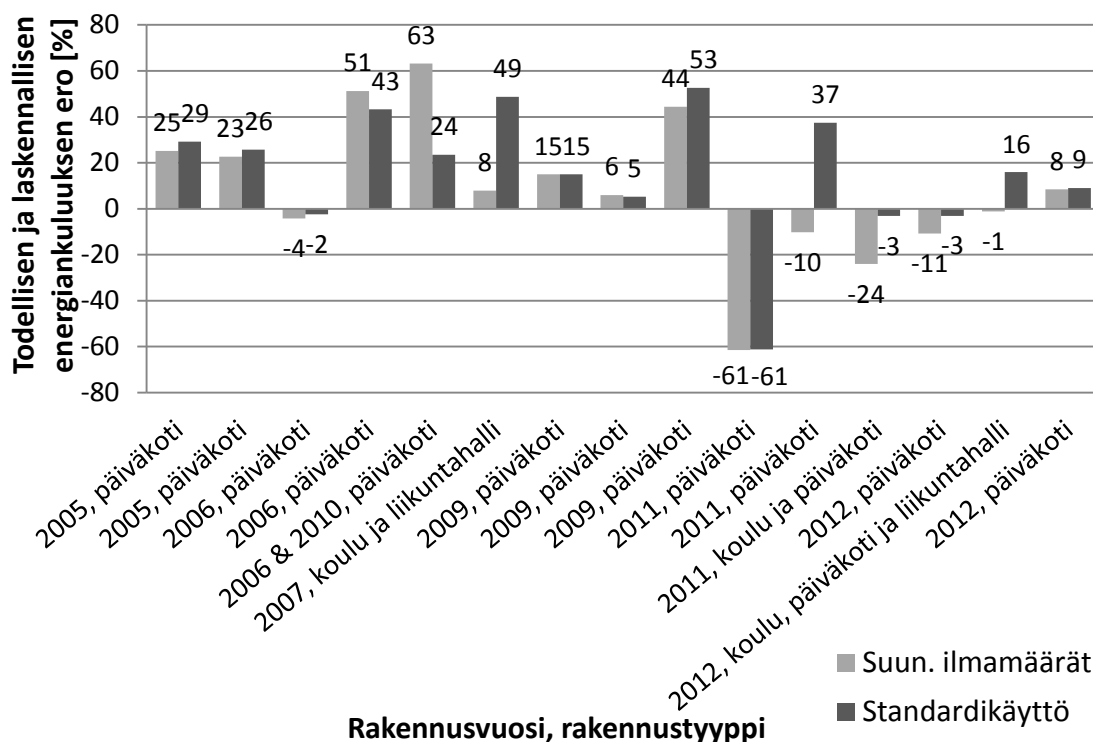
Tarkastellaan seuraavaksi energiankulutuksia suunnitteluilmamäärillä laskettuna case-kohteissa, joissa ei ole tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Näitä kohteita oli yhteensä 15. Laskentatulokset ja poistoilmamäärät on esitetty taulukkomuodossa liitteessä C. Käyntiaika ja käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto ovat samoja kuin standardikäytöllä. Keskimäärin suunniteltu ilmanvaihtomäärä on $3,14 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$, eli hieman suurempi kuin standardikäytöllä. Kuvassa 4.16 on nähtävillä prosentuaalinen ero todelliseen energiankulutukseen suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä.



Kuva 4.16 Todellisen ja laskennallisen lämpöenergian kulutuksen suhde suunnitelmien ja standardikäytön mukaisilla ilmanvaihtomäärillä.

Kuvasta 4.16 huomataan että toisinaan standardikäytöllä laskettu lämpöenergiankulutus vastaa paremmin toteutunutta kulutusta kuin suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä ja toisinaan taas päinvastoin. Tarkastellaan suunniteltujen ilmamäärien paremmuutta laskemalla kuinka paljon prosentuaalinen ero on lähempänä tai kauempana toteutuneesta kulutuksesta. Keskimäärin suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä saadaan näin 0,7 % parempi vastaavuus lämpöenergiankulutuksessa. Lämpöenergian kulutuksen prosentuaaliselle erolle suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä laskettuna keskiarvo on 37,5 %, mediaani 35,0 %, minimi -30,7 % maksimi 149,1 % ja keskihajonta 49,2 %.

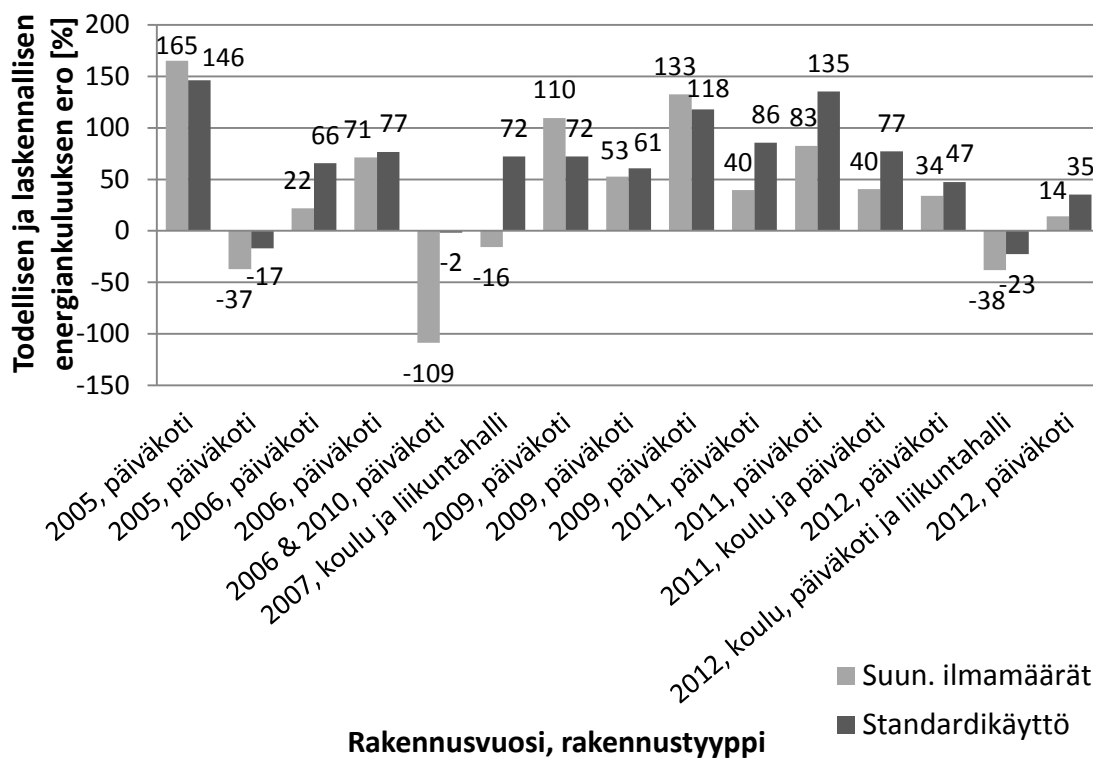
Kuvassa 4.17 on esitetty sähköenergian kulutus suunnitelluilla ja standardinmukaisilla ilmanvaihtomäärillä.



Kuva 4.17 Todellisen ja laskennallisen sähköenergian kulutuksen suhde suunnitelmien ja standardikäytön mukaisilla ilmanvaihtomäärillä.

Keskimäärin todellisilla ilmanvaihtomäärillä saadaan 1,3 % parempi vastaavuus sähköenergian kulutuksessa. Sähköenergian prosentuaaliselle erolle suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä laskettuna keskiarvo on +15,7 %, mediaani +15,9 %, minimi -61,1 % maksimi +52,6 % ja keskihajonta 28,2 %.

Energiankulutuksen ero laskennalliseen kulutukseen nähden todellisilla ja standardikäytönmukaisilla ilmamäärillä on esitetty kuvassa 4.18.



Kuva 4.18 Todellisen ja laskennallisen yhteenlasketun energiankulutuksen suhde suunnitelmien sekä standardikäytön mukaisilla ilmanvaihtomäärillä.

Keskimäärin todellisilla ilmanvaihtomäärillä saadaan 5,3 % parempi vastaavuus yhteenlasketussa energiankulutuksessa. Energiankulutuksen summan prosentuaaliselle erolle suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä laskettuna keskiarvo on +63,9 %, mediaani +72,2 %, minimi -22,6 % maksimi +146,1 % ja keskihajonta 50,0 %.

4.2.2 Virhelähteet ja tulosten arviointi

Tarkasteltaessa toteutuneita lämpöenergiankulutuksia on huomattava, että lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvan energian osuus on mukana rakennusten skaalatussa lämmitysenergiassa. Vaikutuksen suuruus riippuu lämpimän käyttöveden määrästä ja todellisen lämmitystarveluvun suhteesta referenssivuoden lämmitystarvelukuun. Vaikutuksen suuruudesta on esitetty esimerkki alaluvussa 3.1.

On mahdollista, että saaduissa kulutuslukemissa on virheitä. Lukemien luennassa ja kirjaamisessa voi olla virheitä ja toisinaan mittarit voivat toimia virheellisesti.

Kahdessa kohteessa on käytetty suunnitelmien mukaan tuloilman sisäänpuhalluslämpötilana 22 °C, jolloin sisälämpötila saattaisi olla todellisuudessa korkeampi kuin 21 °C, jota tulee käyttää laskelmissa. Myös muissa kohteissa sisälämpötila voi olla todellisuudessa korkeampi.

Tuloksista on syytä huomata, että tarpeenmukaisesti ohjattujen ilmanvaihtojärjestelmien sähkönkulutus on laskettu yksinkertaistetusti kaavan (2.61) mukaan, toisin kuin laskentaohje RakMK D5 (2012) neuvoo.

Tietojen hankinnassa on toisinaan ollut hankaluuksia, jolloin on jouduttu turvautumaan oletusarvoihin. Myös tietojen arkistointikäytännöt ovat muuttuneet vuosien varrella, riippuen myös kaupungeittain. Ilmanvuotolukuja on vaikea löytää ajalta ennen vuoden 2007 määräyksien voimaantuloa. Ikkunoiden g-arvot on ilmoitettu harvoin suunnitelmissa. Ilmanvuotoluku ja g-arvo ovat näissä case-kohteissa löydettävissä usein arkkitehdin suunnitelmista, jos niitä on ylipäättään ilmoitettu. Talotekniikka- ja automaatio suunnitelmien taso on varsin vaihteleva, jolloin välttämättä kaikkia sähkölaitteita ei edes löydy suunnitelmista, asiat on merkitty eri tavoin tai hajanaisesti.

Laskentamenetelmän soveltuvuudesta voidaan sanoa, että toisinaan RakMK D5 (2012) ei tarjoa riittäviä ohjeita laskentaa varten. Varjostuskertoimien laskenta erilaisille varjostusratkaisuille täytyy tehdä soveltaen (esimerkiksi erilaiset säleiköt ikkunoiden ulkopuolella tai varjostukset, jotka muodostavat suuremman varjostuskulman kuin taulukoiden maksimi-arvot). Suunnitelmista ei välttämättä löydy kaikkia tarpeellisia arvoja, jolloin joudutaan turvautumaan oletuksiin laskennassa. Nämä oletusarvot jotka RakMK osassa D5 (2012) annetaan, eivät vaikuta vastaavan aina kovin hyvin todellisuutta. Esimerkiksi ikkunoiden g-arvoja on harvoin ilmoitettu, mutta jos arvo on ilmoitettu, on se ollut pienempi kuin taulukon 2.15 arvot, joita tulee käyttää laskennassa jos parempaa tietoa ei ole. Ilmanvaihdolla, ja sen toimivuudella on suuri merkitys rakennuksen energiankulutukselle. Tuloksiin vaikuttaa melko paljon lämmöntalteenotto. On mahdollista, että lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta ei ole laskettu oikein tai se ei vastaa todellista lämmöntalteenottoa.

Lähtöarvojen tarkentamisella voitaisiin päästä tarkempiin tuloksiin. Laskentamenetelmä saattaa olla toimiva huolimatta tietyistä puutteista, mutta ongelmat saattavat johtua esimerkiksi standardikäytön antamista lähtötiedoista.

Rakentamismääräyskokoelma käyttää energiatehokkuuden mittarina tehokkuutta pinta-alaa kohden. Energiatehokkuuden indikaattoriksi sopisi kuitenkin kouluissa ja päiväkodeissa paremmin käytetty energia lasta tai oppilasta kohden. Energiankulutukselle tilapalveluiden energiaseurannassa on yleensä käytetty myös tilavuutta, mikä etenkin lämmönkulutuksessa olisi parempi indikaattori.

Laskelmia tehtäessä testattiin eräiden lähtöarvojen vaikutusta laskentatulokseen ja näin huomattiin, että muun muassa ilmanvuotoluku, ilmanvaihtomäärät, sisälämpötila ja lämmöntalteenotto ovat merkittäviä muuttujia.

Käyntioivista kulkeminen voi aiheuttaa lämpöhukkaa etenkin palvelurakennuksissa, joissa ovista kulkee päivittäin kymmeniä tai jopa satoja ihmisiä. Tätä lämpöhukkaa mahdollisesti lisäävät vielä ovien läheisyyteen asennetut kiertoilma- ja oviverhokojeet.

RakMK D5 (2012) laskee lämpöhäviön ovien kautta vain johtumisena, vaikka se syntyy myös ovien avaamisen aiheuttamista konvektiovirtauksista.

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on tutkittu Tampereen ja Helsingin päiväkotien ja koulujen energiankulutusta rakennusvuoden suhteen järjestämällä energiankulutus bruttoneliötä kohden kuvaajiin. Päiväkoteja ja kouluja on tutkittu vertailemalla niitä keskenään, sekä yhtenä ryhmänä. Rakennusten toteutuneen ja laskennallisen energiankulutuksen vertailu on tehty laskemalla energiankulutus case-kohteille. Laskenta on tehty standardikäytöllä ja RakMK osan D5 (2012) mukaan. Standardikäytön lisäksi laskenta on tehty suunnitelluilla ilmanvaihtomäärillä. Vertailulla on pyritty selvittämään kuinka hyvin laskettu kulutus vastaa todellista kulutusta. Energiankulutusta on käsitelty tässä työssä neliöperusteisena, koska näin tehdään myös RakMK osassa D3 (2012). Energiankulutuksella tarkoitetaan tässä työssä järjestelmien ja laitteiden käyttämää energiaa, joka on lämpöenergiaa, sähköenergiaa tai polttoainetta.

Standardikäyttö on määritetty RakMK osassa D3 (2012). Standardikäyttö määrittää rakennuksen lämpökuormat ihmisistä ja sähkölaitteista, ilmanvaihtomäärät ja käyttöajat. Määräystenmukaisuuden osoittaminen ja laskelmat tässä diplomityössä on tehty säävyöhykkeen I olosuhteissa, jotka on määritetty RakMK D3 (2012) liitteessä 2 sekä tämän diplomityön liitteessä A. Loput laskennan lähtötiedot on saatu suunnitelmista tai ne on määrätty RakMK osassa D5 (2012). Energialaskenta voi antaa erilaisia tuloksia riippuen käytettävästä laskentatyökalusta ja laskentaa varten tehdyistä oletuksista. Lähtöarvojen tarkkuudella on myös merkitystä.

Ostoenergiankulutuksen laskenta on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmalla RakMK osan D5 (2012) mukaan, ensin standardikäytöllä ja sitten suunnitelmien mukaisilla ilmamäärillä sekä paikallisen säävyöhykkeen olosuhteilla. Ostoenergialla tarkoitetaan tässä työssä kiinteistöön ulkopuolelta tuotavaa sähkö- ja kaukolämpöenergiaa tai polttoainetta. Standardikäyttöä täydentävät tiedot ovat peräisin pääasiassa toteutussuunnitelmista. Osassa case-kohteita on jäähdytys keittiössä, mutta jäähdytykseen kuluva energia ei ole mukana laskelmissa, koska laskentamenetelmä antaa mahdollisuuden olla huomioimatta yksittäisiä jäähdytettyjä tiloja. Case-kohteille laskettiin myös muutamia energiatehokkuutta kuvaavia lukuja ja tutkittiin niiden suhtautumista laskennalliseen ja toteutuneeseen energiankulutukseen.

Case-kohteet ovat vuoden 2005 jälkeen rakennettuja rakennuksia Helsingistä, Tampereelta ja Oulusta. Otokoko on 22 ja kulutustiedot pääosin vuodelta 2015. Pidemmän aikavälin toteutuneen energiankulutuksen tarkastelussa ovat mukana Helsingin ja Tampereen koulut sekä päiväkodit. Kulutustiedot ovat vuodelta 2014. Kulutusjakso on vuotta aiempi kuin case-kohteiden, koska tiedot on kerätty vuoden 2015 puolella.

Otoskoot vaihtelevat hieman lämpöenergian, sähköenergian ja yhdistetyn energiankulutuksen tarkasteluissa siten että mukana otoksessa on 38–43 % kouluista ja päiväkodeista, joita on yhteensä 558.

Tarkasteltaessa energiankulutuksen keskiarvoja havaittiin, että eri-ikäisissä rakennusjoukoissa sähköenergian kulutus oli kasvanut 3,7 %, lämpöenergian kulutus oli pienentynyt 7,1 % ja lämmön ja sähkön yhdistetty energiankulutus oli pienentynyt 4,6 % rakennusjoukkojen 1995–2004 ja 2005–2013 välillä. Päiväkotien ja koulujen energiankulutusta vertaillen kävi ilmi että päiväkodit kuluttavat enemmän energiaa kuin koulut. Myös Espoon päiväkotien ja opetusrakennuskannassa on havaittu lämpöenergian kulutuksen vähenemistä

Näin ollen vuoden 2005 jälkeen rakennettujen koulujen ja päiväkotien energiankulutus olisi vähentynyt muutamia prosentteja, kun verrataan vuosina 1995–2004 rakennettujen rakennusten tasoon. Päiväkotien ja koulujen energiankulutuksen väheneminen ei näiden tulosten perusteella ole ollut merkittävä.

Suurimmat erot standardikäytön mukaisen laskennallisen ja toteutuneen energiankulutuksen välillä esiintyivät lämpöenergian kulutuksessa. Tuloksista saadaan laskennallisten ja todellisten energiankulutuksien eron keskiarvoksi lämmölle +68,7 %, sähköenergialle +15,4 % ja energialle yhteensä +41,3 %. Keskihajonta prosentuaalisille eroille on lämmölle 69,9 %, sähkölle 27,8 % ja energialle 37,3 %. Jättämällä tarkastelun ulkopuolelle 2014 rakennetut rakennukset, joissa ilmastointi on ollut jatkuvasti päällä, saadaan prosentuaalisten erojen keskiarvoksi lämmölle +55,7 %, sähkölle +14,0 % ja energialle yhteensä +33,4 %.

Keskiarvoa tarkasteltaessa energialaskenta ei ole antanut kovin luotettavia tuloksia. Toisinaan kuitenkin laskennassa on päästy melko lähelle toteutunutta kulutusta, eli on myös mahdollista että energialaskenta antaa todenmukaisia tuloksia. Rakennusten käyttöön olisi hyvä tutustua tarkemmin sekä tarkastella johtuvatko nämä laskennallisen ja toteutuneen energiankulutuksen väliset erot käytöstä. Lähtöarvojen tarkentamisella voitaisiin päästä tarkempiin tuloksiin. Laskentamenetelmä saattaa olla toimiva huolimatta tietyistä puutteista, mutta ongelmat saattavat johtua epätarkoista lähtötiedoista.

Todellisten ilmanvaihtomäärien käyttö antoi energiankulutukselle sellaisia arvoja, jotka eivät aina vastanneet paremmin toteutunutta energiankulutusta. Keskimäärin kulutuksen vastaavuus on 0,7 % parempi lämpöenergialle, 1,3 % sähkölle ja 4,7 % energialle yhteensä. Laskentaa voitaisiin vielä tarkentaa rakennuksen käyttöajan ja ilmanvaihdon käyntiajan tarkentamisella, mutta nämä tulokset viittaavat siihen, ettei ilmanvaihtomäärien ja säävyöhykkeen tarkentaminen välttämättä paranna laskelmien todenmukaisuutta.

Laskettujen lämpöenergian kulutukseen liittyvien tunnuslukujen perusteella voidaan sanoa, että vaipan pinta-alan suhteella rakennuksen nettopinta-alaan on hyvin pieni korrelaatio toteutuneeseen tai laskennalliseen energiankulutukseen. Ominaislämpöhäviöiden suhde rakennuksen nettopinta-alaan korreloi laskennallisen kulutuksen kanssa paremmin kuin johtumislämpöhäviöiden tai vaipan pinta-alan suhde rakennuksen nettopinta-alaan. Johtumislämpöhäviöiden kohdalla korrelaatiokerroin laskennalliselle lämpöenergian kulutukselle on 0,93, mutta toteutuneelle vain 0,11.

Tämä opinnäytetyö kuvaa ainoastaan kolmen kaupungin palvelurakennusten energiatehokkuutta. Toisissa kunnissa ja yksittäisissä rakennuksissa saatetaan kiinnittää energiatehokkuuteen enemmän huomiota, mikä voi vaikuttaa suurestikin rakennusten energiankulutukseen.

Energiatodistus voisi olla työkalu rakennuksen energiankulutuksen tarkastelussa käyttäjille ja omistajille. Muutamalla pienellä muutoksella lähtöarvoissa energialaskenta voidaan tehdä vyöhykkeen I ilmaston sijaan paikallisessa ilmastossa, suunnitelluilla ilmamäärillä ja käyntiajoilla, jolloin laskennallista energiankulutusta voitaisiin verrata toteutuneeseen energiankulutukseen suuntaa-antavana ohjearvona.

Yhteiskunnan kannalta tulisi miettiä onko tällainen monimutkainen laskenta kannattava tehdä sekä tuottaako se lisäarvoa kun ominaislämpöhäviöiden laskemisella pystytään osoittamaan rakennuksen energiatehokkuus lämmöneristyksen, vuotoilman ja ilmanvaihdon osalta ja sähkönkulutusta rajoittavat lähinnä taloteknisten laitteiden energiatehokkuusvaatimukset. On tosin syytä huomata, että ominaislämpöhäviölaskelma ei ota huomioon jäähdytystä, eli se sopisi paremmin jäähdyttämättömille kohteille. Jos nykyisestä energiatehokkuuden osoittamismenettelystä luovuttaisiin, tulisi kehittää muita tapoja hyvittää itse tuotettu energia ja ympäristön kannalta paremmat energiaratkaisut sekä mahdollisesti kehittää rajat sähkönkulutukselle. On syytä myös miettiä onko päiväkotien ja koulujen säilyttäminen samassa rakennusluokassa tarkoituksenmukaista, sillä päiväkodit ainakin tässä joukossa kuluttavat enemmän energiaa.

Mahdollisesti rakennusten standardikäyttöä tulisi vielä tarkastaa, jotta tulokset vastaisivat paremmin todellisuutta. Tulisi kuitenkin ensin tietää johtuvatko laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen erot käytetystä laskentamenetelmästä vai lähtöarvoista. Tätä varten jouduttaisiin tutkimaan molemmat vaihtoehdot. Jatkotutkimusta voitaisiin tehdä simulointien avulla ja tarkastella kuinka hyvin simulointi toimii RakMK mukaisena energialaskentana. Lisäksi voitaisiin tarkastella lähtöarvojen tarkkuuden merkitystä energialaskennan ja todellisen energiankulutuksen kannalta. Toinen hyvä aihe olisi RakMK D5 (2012) mukaisen laskennan tarkentaminen lähtöarvojen osalta. Näiden tutkimusten ja tämän diplomityön avulla voitaisiin perustella tarve lähtöarvojen tai käytettävien laskentatyökalujen tarkkuusvaatimuksille.

LÄHTEET

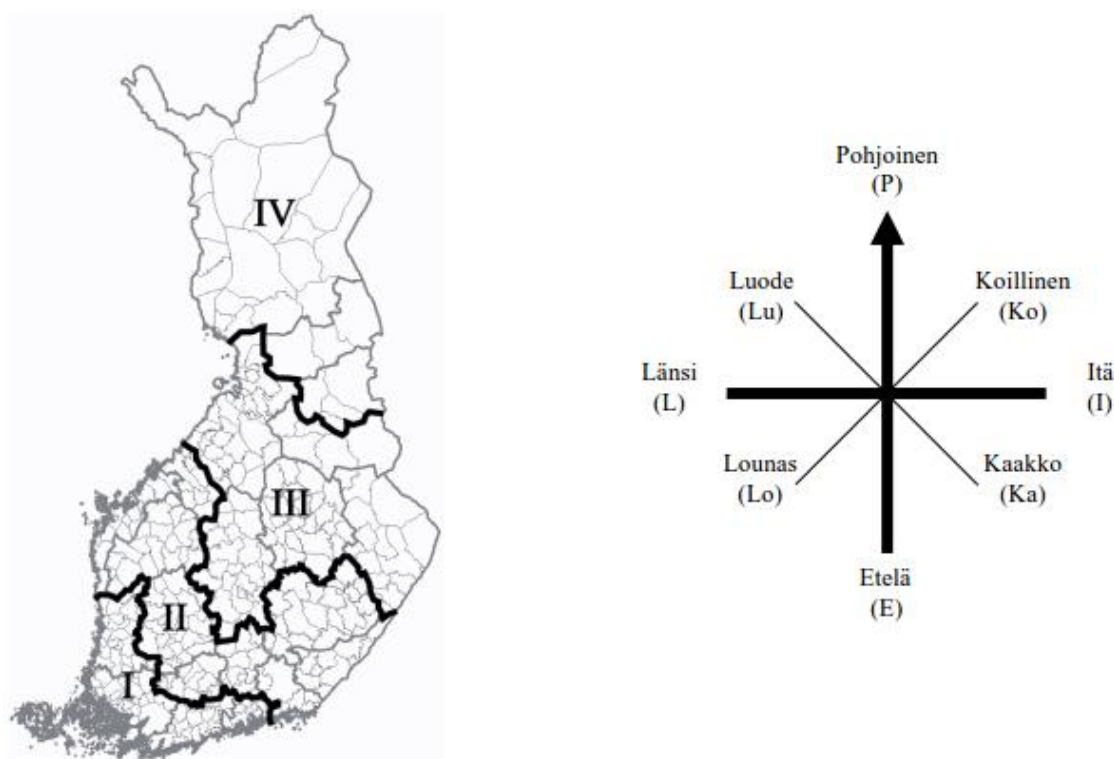
- [1] RIL 265-2014 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Tammerprint Oy, 2014, 189 s.
- [2] A. Nielsen, Energy Efficient Houses in Denmark and Moisture Conditions in Highly Insulated Constructions– Rules, Practice and Education. Rakennusfysiikka 2015 seminaarijulkaisu, Tampere, 20–22 lokakuuta, Juvenes Print, Tampere, 2015, s. 21–36.
- [3] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus, verkkojulkaisu. ISSN=1799-795X. 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 16. Energian kokonaiskulutus ja loppukäyttö 1970–2014*, Helsinki, Tilastokeskus, Saatavissa (viitattu 7.7.2015):
http://www.stat.fi/til/ehk/2014/04/ehk_2014_04_2015-03-23_kuv_016_fi.html
- [4] C. Hagentoft, Introduction to Building Physics, Studentlitteratur AB, 2003, 442 s.
- [5] U. Siikanen, Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia, 2. painos, Rakennustieto Oy, 2015, 256 s.
- [6] H. Hens, Building Physics – Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises, Deutsche Nationalbibliothek, 2007, 270 s.
- [7] C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Lämmöneristys ohjeet 2003, Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä, Ympäristöministeriö, 2002, 24 s. Saatavissa: www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf
- [8] S. Paloniitty, Rakennusten tiiviysmittaus, 2. painos, Suomen Rakennusmedia Oy, 2013, 92 s.
- [9] D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten energiatehokkuus Määräykset ja ohjeet 2012, Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta, Ympäristöministeriö, 2011, 35 s. Saatavissa:
http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf
- [10] A.F. Mills, Basic Heat and Mass Transfer, 2nd Edition, Prentice Hall, Inc. 1999, 1000 p.
- [11] F. Incropera, D. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition, John Wiley & Sons, 2002, 981 p.

- [12] RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki, 2014, 500 s.
- [13] M. Airaksinen, Energy Use in Day Care Centers and Schools, *Energies*, Vol. 4, 2011, pp. 998-1009. Saatavissa: <http://www.mdpi.com/1996-1073/4/6/998/pdf>
- [14] T. Sekki, M. Airaksinen, A. Saari, Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city, *Energy and Buildings*, Vol. 87, 2015, pp. 105–115. Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814009633/pdf?md5=45c6a558037d380690c27467300cf07f&pid=1-s2.0-S0378778814009633-main.pdf>
- [15] Julkisten rakennuksien energiatehokkuus, Sektoritutkimuksen neuvottelukunta, Kestävä kehitys, 4-2008, 62 s.
- [16] Ilmatieteenlaitos, Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. (Viitattu 21.8.2015)
<http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>
- [17] D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2003, Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta, Ympäristöministeriö, 2002, 30 s. Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/data/normit/1921-D2s.pdf>
- [18] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, 545/2015. Saatavissa (viitattu 7.7.2015)
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>
- [19] O. Seppänen, M. Seppänen, Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka, 2. korjattu painos, Sisäilmayhdistys ry, 1997, 279 s.
- [20] M. Airaksinen, M. Vuolle, Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building, *Energies*, Vol. 6, No: 1, 2013, pp. 235–250. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.3390/en6010235>
- [21] J. Vinha, A. Laukkarinen, M. Mäkitalo, S. Nurmi, P. Huttunen, T. Pakkanen, P. Kero, E. Manelius, J. Lahdensivu, A. Köliö, K. Lähdesmäki, J. Piironen, V. Kuhno, M. Pirinen, A. Aaltonen, J. Suonketo, J. Jokisalo, O. Teriö, A. Koskenvesa, T. Palolahti, Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159, Tampere 2013, 405 s.

- [22] W. Beck, D. Dolmans, G. Dutoo, A. Hall, O. Seppänen, Aurinkosuojaus, Aurinkosuojauksen suunnittelu kestävän kehityksen mukaisiin rakennuksiin, REHVA ja ES-SO, 2011, 74 s.
- [23] J. Kurnitski, Energiämääräykset 2012, Opas uudisrakennusten energiämääräysten soveltamiseen, 2. painos, Suomen Rakennusmedia Oy, 2012, 154 s.
- [24] M. Sepponen, P. Tuominen, A. Ruuska, A. Knuuti, J. Laamanen, T. Kauppinen, T. Vesanen, Lähes nollaenergiatasoinen vanhusten palvelutalo, Hankinta, suunnittelu ja toteutus, VTT, 2014. 36 s. Saatavissa: http://www.sitra.fi/julkaisut/muut/Lahes_nollaenergiatasoinen_vanhusten_palvelutalo.pdf
- [25] D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitysteontarpeen laskenta, Ohjeet 2012, Ympäristöministeriön ohjeet rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta, Ympäristöministeriö, 2013, 74 s. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/29520-D5-190607-suomi.pdf>
- [26] M. Virpi, Energialaskureiden vertailu, Opinnäytetyö, Oulun ammattikorkeakoulu, 2015, 90s. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90905/Virpi_Mikko.pdf?sequence=1
- [27] O. Rantanen, Koneellisen jäähdytystarpeen tarkastelu pientalossa, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2015, 187 s. Saatavissa: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23325/rantanen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten energiatehokkuus Määräykset ja ohjeet 2010, Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta, Ympäristöministeriö, 2008, 14 s. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/34165-D3-2010_suomi_22-12-2008.pdf
- [29] Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa, Ympäristöministeriön moniste 122, Ympäristöministeriö, Helsinki, 2003, 35 s. Saatavissa http://www.laskentapalvelut.fi/maaraykset/YM_opas_122.pdf
- [30] [Laskentapalvelut.fi](http://www.laskentapalvelut.fi)
- [31] B. Wauman, H Breesch, D Saelens, Evaluation of the accuracy of the implementation of dynamic effects in the quasi steady-state calculation method for school buildings. Energy and Buildings, Vol. 65, 2013, pp. 173–184. Saatavissa: doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.046

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTÄVÄT SÄÄTIEDOT

Ote Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) liitteestä 2.



Kuva A.1 Säävyöhykkeet [9, s.29]

Taulukko A.1 Ulkoilman keskilämpötila ja lämmitystarveluvut [muokattu 9, s. 30–31]

Säävyöhyke	I ja II		III	
	Ulkoilman keski-lämpötila (°C)	Lämmitystarveluku S17 (Kd)	Ulkoilman keski-lämpötila (°C)	Lämmitystarveluku S17 (Kd)
Tammikuu	-3,97	650	-8,00	775
Helmikuu	-4,50	602	-7,10	675
Maaliskuu	-2,58	607	-3,53	637
Huhtikuu	4,50	354	2,42	437
Toukokuu	10,76	117	8,84	210
Kesäkuu	14,23	9	13,39	60
Heinäkuu	17,30	0	15,76	22
Elokuu	16,05	31	13,76	78
Syyskuu	10,53	161	9,18	218
Lokakuu	6,20	331	4,07	401
Marraskuu	0,50	495	-1,76	563
Joulukuu	-2,19	595	-5,92	706
Koko vuosi	5,57	3952	3,43	4782

Taulukko A.2 Auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille säävyöhykkeissä I ja II. [muokattu 9, s. 30]

Kuukausi	Gsäteily, pystypinta (kWh/m ²)							
	Po	Ko	It	Ka	Et	Lo	Lä	Lu
Tammikuu	6,2	4,7	3,8	9,5	12,9	9,5	3,8	4,7
Helmikuu	17,3	13,8	15,6	31,0	41,4	30,9	15,6	14,0
Maaliskuu	40,3	38,1	48,5	75,1	89,5	69,4	43,7	36,9
Huhtikuu	43,9	56,3	79,9	101,1	107,3	101,6	80,6	56,8
Toukokuu	57,8	82,1	112,8	123,3	116,0	117,5	104,5	76,3
Kesäkuu	70,6	87,9	109,6	109,9	101,6	110,9	111,2	89,1
Heinäkuu	66,3	91,1	118,8	123,1	115,5	128,6	122,7	91,2
Elokuu	50,0	66,4	91,8	106,0	100,4	92,8	78,8	61,1
Syyskuu	32,9	37,5	56,5	83,9	100,5	87,3	59,3	38,1
Lokakuu	17,9	15,6	17,5	28,3	37,0	30,0	18,8	15,7
Marraskuu	7,2	5,5	5,1	12,3	16,8	12,3	5,1	5,6
Joulukuu	4,2	3,2	2,6	8,4	11,8	8,8	2,9	3,2

Taulukko A.2 Auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille säävyöhykkeessä III. [muokattu 9, s. 31]

Kuukausi	Gsäteily, pystypinta (kWh/m ²)							
	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	6,0	4,5	3,1	6,5	9,0	6,8	3,3	4,5
Helmikuu	16,4	12,8	15,6	34,4	46,3	33,5	15,1	12,8
Maaliskuu	38,7	35,2	37,9	55,1	69,8	60,2	42,1	36,1
Huhtikuu	46,1	54,5	73,5	93,6	99,1	89,5	70,0	53,6
Toukokuu	68,9	91,3	122,6	132,4	123,4	124,5	115,0	88,5
Kesäkuu	72,7	87,1	105,4	108,0	103,3	107,5	103,6	85,0
Heinäkuu	65,1	81,4	106,2	115,0	109,4	111,6	104,5	82,6
Elokuu	48,0	57,0	74,5	91,7	98,3	94,5	77,3	58,1
Syyskuu	30,6	34,2	51,8	77,7	91,6	76,1	50,1	33,4
Lokakuu	15,3	13,6	18,5	33,1	42,5	32,1	17,6	13,3
Marraskuu	6,9	5,3	4,9	10,7	14,6	10,7	4,9	5,3
Joulukuu	3,3	2,5	1,6	3,3	4,4	3,2	1,6	2,5

LIITE B: LASKENTATULOKSET STANDARDIKÄYTÖLLÄ

Taulukko B.1 Case-kohteiden laskennallinen ja normeerattu (testivuosi Vantaa 2012) toteutunut lämpöenergian kulutus.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Las- kettu (MWh)	Toteutu- nut (norm.) (kWh/m ²)	Toteutu- nut (norm.) (MWh)	Ero (%)	Ero (MWh)
2005, päiväkot	1227.7	188.9	231.9	261.6	321.1	38.5	89.2
2005, päiväkot	306.3	238.8	73.1	165.4	50.7	-30.7	-22.5
2006, päiväkot	1250.9	126.2	157.8	160.2	200.3	26.9	42.5
2006, päiväkot	1808.3	116.6	210.8	138.4	250.3	18.8	39.6
2006 & 2010, päiväkot	2266.1	129.1	292.5	92.0	208.4	-28.8	-84.1
2007, koulu ja liikuntahalli	6258.5	83.8	524.3	109.9	687.8	31.2	163.6
2009, päiväkot	1051.5	132.7	139.5	194.5	204.5	46.6	65.0
2009, päiväkot	1329.3	159.8	212.4	215.6	286.7	35.0	74.3
2009, päiväkot	377.6	103.9	39.2	182.9	69.1	76.1	29.8
2009, koulu	7354.9	55.1	405.3	116.5	856.7	111.4	451.4
2011, päiväkot	1512.9	83.8	126.8	208.8	315.8	149.1	189.1
2011, päiväkot	1443.7	32.5	47.0	78.5	113.4	141.3	66.4
2011, päiväkot	1153.5	112.4	129.6	222.0	256.1	97.5	126.4
2011, koulu ja päiväkot	1149.0	104.4	119.9	183.8	211.2	76.1	91.2
2012, koulu ja päiväkot	2956.2	69.0	203.9	91.9	271.6	33.2	67.7
2012, päiväkot	819.9	107.0	87.7	156.5	128.3	46.3	40.6
2012, koulu, päi- väkot ja liikunta- halli	5165.9	208.6	1077.4	145.0	749.0	-30.5	-328.4
2012, päiväkot	2028.4	81.5	165.2	92.0	186.5	12.9	21.3
2013, koulu ja päiväkot	4909.0	43.5	213.5	133.5	655.3	206.9	441.8
2014, koulu ja päiväkot	2333.6	69.0	160.9	166.0	387.4	140.8	226.5
2014, päiväkot	1892.1	108.9	206.0	219.8	415.9	101.9	209.9
2014, päiväkot	1354.7	80.0	108.4	248.9	337.1	211.1	228.8
Keskiarvo		110.7		162.9		68.7	

Taulukko B.2 Case-kohteiden laskennallinen ja toteutunut sähköenergian kulutus.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Las- kettu (MWh)	Toteutu- nut (kWh/m ²)	Toteutu- nut (MWh)	Ero (%)	Ero (MWh)
2005, päiväkot	1227,7	63,3	77,7	81,8	100,4	29,3	22,7
2005, päiväkot	306,3	84,4	25,8	106,1	32,5	25,7	6,7
2006, päiväkot	1250,9	81,5	102,0	79,6	99,6	-2,4	-2,4
2006, päiväkot	1808,3	59,7	107,9	85,5	154,6	43,2	46,7
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	68,2	154,5	84,2	190,8	23,5	36,3
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	47,0	294,4	70,0	438,0	48,8	143,6
2009, päiväkot	1051,5	70,7	74,4	81,4	85,6	15,0	11,2
2009, päiväkot	1329,3	92,1	122,4	96,9	128,8	5,3	6,5
2009, päiväkot	377,6	73,9	27,9	112,8	42,6	52,6	14,7
2009, koulu	7354,9	78,2	575,3	62,5	459,8	-20,1	-115,5
2011, päiväkot	1512,9	64,4	97,5	25,0	37,9	-61,1	-59,6
2011, päiväkot	1443,7	64,4	93,0	71,9	103,8	11,7	10,8
2011, päiväkot	1153,5	69,0	79,6	94,8	109,3	37,4	29,7
2011, koulu ja päiväkot	1149,0	70,1	80,5	67,9	78,0	-3,1	-2,5
2012, koulu ja päiväkot	2956,2	48,6	143,5	52,5	155,3	8,2	11,8
2012, päiväkot	819,9	71,2	58,4	69,0	56,6	-3,1	-1,8
2012, koulu, päi- väkot ja liikunta- halli	5165,9	66,2	341,7	76,7	396,2	15,9	54,5
2012, päiväkot	2028,4	61,9	125,6	67,5	136,9	9,0	11,3
2013, koulu ja päiväkot	4909,0	52,2	256,3	68,3	335,3	30,8	78,9
2014, koulu ja päiväkot	2333,6	60,6	141,5	47,4	110,5	-21,9	-31,0
2014, päiväkot	1892,1	63,5	120,1	98,3	186,1	54,9	66,0
2014, päiväkot	1354,7	77,2	104,6	107,2	145,2	38,8	40,6
Keskiarvo		67,6		77,6		15,2	

Taulukko B.3 Case-kohteiden laskennallinen ja normeerattu (testivuosi Vantaa 2012) toteutunut energiankulutus, kulutusjakso ja huomioitavaa laskennassa.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Toteutunut (norm.) (kWh/m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Ero (%)	Kulutus- jakso	Huomioitavaa
2005, päiväkot	1227,7	343,3	252,1	36,2	2015	Sähköinen lattia- lämmitys osassa rakennusta
2005, päiväkot	306,3	271,5	323,1	-16,0	2015	
2006, päiväkot	1250,9	239,8	207,7	15,4	2011	
2006, päiväkot	1808,3	223,9	176,2	27,1	2015	
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	176,2	197,3	-10,7	2015	
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	179,9	130,8	37,5	2015	
2009, päiväkot	1051,5	275,9	203,4	35,6	2015	
2009, päiväkot	1329,3	312,6	251,8	24,1	2015	
2009, päiväkot	377,6	295,7	177,8	66,3	2015	
2009, koulu	7354,9	179,0	133,3	34,3	2015	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto
2011, päiväkot	1512,9	233,8	148,2	57,7	2015	
2011, päiväkot	1443,7	150,4	96,9	55,2	12/13– 11/14	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto
2011, päiväkot	1153,5	316,8	181,4	74,6	2015	
2011, koulu ja päiväkot	1149,0	251,7	174,5	44,3	2015	
2012, koulu ja päiväkot	2956,2	144,4	117,5	22,9	12/13– 11/14	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto
2012, päiväkot	819,9	225,5	178,1	26,6	2015	Puolilämmin tila oletettu +17 °C
2012, koulu, päiväkot ja lii- kuntahalli	5165,9	221,7	274,7	-19,3	2015	
2012, päiväkot	2028,4	159,4	143,4	11,2	2015	
2013, koulu ja päiväkot	4909,0	201,8	95,7	110,8	3/15–2/16	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto
2014, koulu ja päiväkot	2333,6	213,4	129,6	64,7	2015	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto, T _{sp} =22C
2014, päiväkot	1892,1	318,1	172,3	84,6	2015	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto, T _{sp} =22 °C
2014, päiväkot	1354,7	356,0	157,2	126,5	2015	Tarpeenmukai- nen ilmanvaihto,
Keskiarvo		240,0	178,2	41,1		

LIITE C: LASKENTATULOKSET SUUNNITELLUILLA ILMAN- VAIHTOMÄÄRILLÄ JA TODELISELLA SÄÄVYÖHYKKEELLÄ

Taulukko C.1 Case-kohteiden laskennallinen ja normeerattu (testivuosi Vantaa 2012) toteutunut lämpöenergian kulutus todellisilla ilmamäärillä ja paikallisella säävyöhykkeellä.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Toteutunut (norm.) (kWh/m ²)	Laskettu (MWh)	Toteutunut (norm.) (MWh)	Ero (%)
2005, päiväkot	1227,7	167,8	316,5	206,0	388,6	38,5
2005, päiväkot	306,3	256,8	200,1	78,7	61,3	-30,7
2006, päiväkot	1250,9	168,4	193,8	210,6	242,4	26,9
2006, päiväkot	1808,3	125,1	167,5	226,3	302,9	18,8
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	252,7	111,3	572,6	252,2	-28,8
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	153,9	133,0	963,4	832,3	31,2
2009, päiväkot	1051,5	90,9	194,5	95,5	204,5	46,6
2009, päiväkot	1329,3	168,4	215,6	223,8	286,7	35,0
2009, päiväkot	377,6	85,0	182,9	32,1	69,1	76,1
2011, päiväkot	1512,9	129,2	208,8	195,5	315,8	149,1
2011, päiväkot	1153,5	128,7	222,0	148,4	256,1	97,5
2011, koulu ja päiväkot	1149,0	121,9	183,8	140,1	211,2	76,1
2012, päiväkot	819,9	114,1	156,5	93,6	128,3	46,3
2012, koulu, päi- väkot ja liikunta- halli	5165,9	212,7	175,5	1098,9	906,4	-30,5
2012, päiväkot	2028,4	102,4	111,3	207,8	225,7	12,9
Keskiarvo		151,9	184,9			37,7

Taulukko C.2 Case-kohteiden laskennallinen ja toteutunut sähköenergian kulutus todellisilla ilmamäärillä.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Toteutunut (norm.) (kWh/m ²)	Laskettu (MWh)	Toteutunut (norm.) (MWh)	Ero (%)
2005, päiväkot	1227,7	65,3	81,8	80,2	100,4	29,3
2005, päiväkot	306,3	86,5	106,1	26,5	32,5	25,7
2006, päiväkot	1250,9	83,1	79,6	104,0	99,6	-2,4
2006, päiväkot	1808,3	56,5	85,5	102,2	154,6	43,2
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	51,6	84,2	116,9	190,8	23,5
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	64,9	70,0	405,9	438,0	48,8
2009, päiväkot	1051,5	70,8	81,4	74,4	85,6	15,0
2009, päiväkot	1329,3	91,5	96,9	121,6	128,8	5,3
2009, päiväkot	377,6	78,1	112,8	29,5	42,6	52,6
2011, päiväkot	1512,9	65,0	25,0	98,3	37,9	-61,1
2011, päiväkot	1153,5	105,5	94,8	121,7	109,3	37,4
2011, koulu ja päiväkot	1149	89,3	67,9	102,6	78,0	-3,1
2012, päiväkot	819,9	77,3	69,0	63,4	56,6	-3,1
2012, koulu, päi- väkot ja liikunta- halli	5165,9	77,6	76,7	400,7	396,2	15,9
2012, päiväkot	2028,4	62,2	67,5	126,2	136,9	9,0
Keskiarvo		75,0	79,9			15,7

Taulukko C.3 Case-kohteiden laskennallinen ja normitettu (testivuosi Vantaa 2012) toteutunut energiankulutus todellisilla ilmamäärillä ja paikallisella säävyöhykkeellä.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Toteutunut (norm.) (kWh/m ²)	Laskettu (kWh/m ²)	Ero (%)
2005, päiväkot	1227,7	398,3	233,1	146,1
2005, päiväkot	306,3	306,2	343,3	-16,9
2006, päiväkot	1250,9	273,4	251,5	65,7
2006, päiväkot	1808,3	253,0	181,7	76,8
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	195,5	304,3	-1,8
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	203,0	218,8	72,2
2009, päiväkot	1051,5	275,9	166,3	72,4
2009, päiväkot	1329,3	312,6	259,8	60,7
2009, päiväkot	377,6	295,7	163,1	117,9
2011, päiväkot	1512,9	233,8	194,2	85,6
2011, päiväkot	1153,5	316,8	234,2	135,4
2011, koulu ja päiväkot	1149,0	251,7	211,3	77,2
2012, päiväkot	819,9	225,5	191,5	47,4
2012, koulu, päiväkot ja liikuntahalli	5165,9	252,1	290,3	-22,6
2012, päiväkot	2028,4	178,8	164,6	35,4
Keskiarvo		264,8	227,2	63,4

Taulukko C.4 Case-kohteiden suunnitellut ja standardinmukaiset poistoilmamäärät.

Rakennusvuosi, Rakennustyyppi	A _{netto} (m ²)	Suunniteltu poistoilmamäärä (l/(s·m ²))	Standardikäytön mukainen poistoilmamäärä (l/(s·m ²))
2005, päiväkot	1227,7	3,08	3,00
2005, päiväkot	306,3	3,26	3,00
2006, päiväkot	1250,9	3,20	3,00
2006, päiväkot	1808,3	1,83	3,00
2006 & 2010, päiväkot	2266,1	3,15	3,00
2007, koulu ja liikuntahalli	6258,5	3,05	2,83
2009, päiväkot	1051,5	2,66	3,00
2009, päiväkot	1329,3	2,94	3,00
2009, päiväkot	377,6	2,65	3,00
2011, päiväkot	1512,9	3,14	3,00
2011, päiväkot	1153,5	3,83	3,00
2011, koulu ja päiväkot	1149	4,11	3,00
2012, päiväkot	819,9	3,79	3,00
2012, koulu, päiväkot ja liikuntahalli	5165,9	3,28	2,77
2012, päiväkot	2028,4	3,11	3,00
Keskiarvo		3,14	